



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL 141584

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
PROSES Pengerasan BAut BAJA S45C UNTUK
OPTIMASI KADAR STRUKTUR MIKRO
MARTENSIT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

LUTFI YUNUS WAHAB AL- AUDHAH
NRP 02511440000034

Dosen Pembimbing:
Sigit Tri Wicaksono, Ph.D.
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR – TL 141584

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
PROSES PENGERASAN BAUT BAJA S45C UNTUK
OPTIMASI KADAR STRUKTUR MIKRO
MARTENSIT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

LUTFI YUNUS WAHAB AL- AUDHAH
NRP 02511440000034

Dosen Pembimbing:
Sigit Tri Wicaksono, Ph.D.
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 141584

**SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
ON HARDENING PROCESS OF STEEL BOLT S45C
FOR OPTIMIZATION MARTENSITE'S
MICROSTRUCTURE USING FINITE ELEMENT
METHOD**

LUTFI YUNUS WAHAB AL- AUDHAH
NRP 02511440000034

Dosen Pembimbing:
Sigit Tri Wicaksono, Ph.D.
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
PROSES PENGERASAN BAIT BAJA S45C UNTUK
OPTIMASI KADAR STRUKTUR MIKRO
MARTENSIT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Lutfi Yunus Wahab Al-Audhah

NRP. 02511440000034

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Sigit Tri Wicaksono, Ph.D. (Pembimbing I)
2. Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA PROSES PENGKERASAN BAIT BAJA S45C UNTUK OPTIMASI KADAR STRUKTUR MIKRO MARTENSIT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Lutfi Yunus Wahab Al-Audhah
NRP : 02511440000034
Departemen : Departemen Teknik Material
Dosen Pembimbing : Sigit Tri Wicaksono, Ph.D.
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.

Abstrak

Hardenability adalah ukuran kualitas dari suatu material untuk dapat dikeraskan, dalam hal ini adalah kemampuannya untuk dapat membentuk martensit minimal 50 %. Baja dengan hardenability tinggi akan memberikan keuntungan bila digunakan untuk membuat benda kerja berpenampang besar yang akan dikeraskan (*hardened & tempered*) sampai ke intinya (*through hardened*). Dalam kasus ini PT. Timur Megah Steel mengalami kegagalan dalam memenuhi standar dalam proses pembuatan baut dengan proses hardening yang terkhusus pada produk pasar ekspor Eropa. Dimana, kadar struktur mikro martensit pada baut yang diharuskan untuk memasuki pasar Eropa adalah tak kurang dari 90%. Untuk upaya analisa kegagalan dan solusi dari permasalahan tersebut dilakukan pelaksanaan penelitian dengan simulasi distribusi temperatur menggunakan metode elemen hingga pada geometri baut tersebut. Simulasi dilakukan pada proses pemanasan

objek dengan temperatur sesuai proses manufaktur di PT. Timur Megah Steel yaitu 850⁰ C selama 1 jam. Selanjutnya simulasi pada proses *hardening* ini dilakukan pendinginan cepat dengan media oli (*oil quench*) dan selanjutnya dilanjutkan dengan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 450⁰ C selama 30 menit. Simulasi dilakukan berdasarkan distribusi temperatur terhadap waktu pada objek baut saat proses pengerasan serta pada proses *tempering*. Hasil analisis distribusi *thermal* pada variabel proses tersebut, kemudian dikorelasikan terhadap kadar martensit yang didapatkan dengan pendekatan menggunakan analisis struktur mikro martensit terhadap temperatur transformasinya pada *Cooling Curve Transformation* (CCT- diagram) serta dari nilai kekerasan baut berdasarkan mikrostruktur martensitenya.

Kata Kunci: Baja S45C, Distribusi temperatur, Martensit, Metode elemen hingga

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON HARDENING PROCESS OF STEEL BOLT S45C FOR OPTIMIZATION MARTENSITE'S MICROSTRUCTURE USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Lutfi Yunus Wahab Al-Audhah
NRP : 02511440000034
Department : Materials Engineering Department
Supervisors : Sigit Tri Wicaksono, Ph.D.
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.

Abstract

Hardenability is a measure to the quality of a material to be hardened, in this case, its ability to form a martensite at least 50%. High hardenability steel will provide an advantage when used to make a large hardened & tempered workpiece (through hardened). PT. Timur Megah Steel fails to fulfil the standard in the process of manufacturing bolts with hardening process that is specialized in the products of European export markets. Where, the martensite microstructure level in the bolts required to enter the European market is no less than 90%. For the effort of the failure analysis and solution of the problem is carried out the implementation of the research by simulating the temperature distribution using finite element method on the geometry of the bolt. Simulation is done on the process of heating the object with temperature according to the manufacturing process at PT. Timur Megah Steel is 850⁰C for 1 hour. Furthermore, simulation on cooling process is done by rapid cooling with oil (oil quench) and then proceed with tempering process with tempering temperature 450⁰ C for 30 minutes. The simulation is based on temperature distribution over time (transient) on bolt object during hardening

process and tempering process. The results of thermal distribution analysis, based on the process variables above, we correlated it to the martensite content obtained using analysis of martensite micro structure to their transformation temperature on Cooling Curve Transformation (CCT-diagram) and also hardness value of bolts based on their martensite microstructure.

Keywords: Finite element method, Martensite, S45C Steel, Temperature distribution,

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah ﷻ atas rahmat, nikmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan menyusun laporan tugas akhir yang berjudul **“Simulasi Distribusi Temperatur Pada Proses Pengerasan Baut Baja S45C Untuk Optimasi Kadar Struktur Mikro Martensit Menggunakan Metode Elemen Hingga”**. Laporan tugas akhir ini disusun untuk melengkapi mata kuliah Tugas Akhir dan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan, bimbingan dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan serta masukan hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Allah ﷻ, karena rahmat-Nya, anugerah ilmu, kesempatan dan kesehatan dari-Nya, penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Sukisno dan Ibu Sri Suwarni selaku orang tua tercinta yang telah memberikan doa dan dukungan yang tak ternilai.
3. Alfian Mey Pramitha Dewi S.T.P. dan Muhammad Hilal Yahya Hidayat selaku Kakak dan Adik tercinta yang selalu memberikan dukungan dan perhatian.
4. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing dan dosen wali penulis yang selalu membina penulis selama menjalani perkuliahan hingga menyelesaikan tugas akhir.

5. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu serta saran kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
6. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
7. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
8. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
9. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
10. Seluruh teman – teman mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
11. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis selalu mengharapkan adanya kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	4
I.3 Batasan Masalah.....	5
I.4 Tujuan Penelitian.....	7
I.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II. 1 Proses Perpindahan Panas	9
II. 2 Baja Karbon	22
II. 2.1 Klasifikasi Baja Karbon.....	23
II. 2.2 Sifat Mekanik Baja	23
II. 3 Baja AISI 1045	25
II. 4 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja	26

II. 4.1 Pengaruh Terhadap Ferrite.....	29
II. 4.2 Pengaruh Terhadap Diagram Fasa	31
II.4.3 Pengaruh Terhadap Diagram Transformasi ..	33
II. 4.4 Pengaruh Terhadap Ukuran Butir	34
II.4.5 Pengaruh terhadap tempering	34
II. 5 Perlakuan Panas Pada Proses Manufaktur Baut	36
II. 5.1 Austenisasi.....	38
II. 5.2 Hardening	39
II. 5.3 Quenching	42
II. 5.4 Tempering	47
II. 6 Diagram TTT dan CCT	55
II. 7 Diagram Fasa	59
II. 8 Tegangan Thermal	64
II. 9 Metode Elemen Hingga.....	65
II. 10 Pengujian Kekerasan	70
II. 11 Hardenability	74

BAB III METODOLOGI

III. 1 Diagram Alir Penelitian	79
III. 2 Material Penelitian	80
III. 2.1 Material Objek Penelitian.....	80
III.2.2 Geometri Sampel Uji.....	80
III. 3 Peralatan Penelitian.....	82
III. 4 Pembuatan Geometri Baut dengan Software Autodesk Inventor Professional 2017	82

III. 5 Permodelan dengan ANSYS Workbench 18.1	84
III. 5.1 <i>Engineering Data</i>	84
III. 5.2 Geometry	85
III. 5.3 Model	85
III. 5.4 Setup	85
III. 5.5 Solution	86
III. 5.6 Result	86
III. 5.7 Validasi	86
III. 6 Standar Sifat Mekanik Baut	87
III. 7. Rancangan Penelitian	89
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
IV. 1 Analisa Data	91
IV. 2 Pembahasan	104
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan	123
V.1 Saran	124
DAFTAR PUSTAKA	xxix
LAMPIRAN-LAMPIRAN	xxxvii
UCAPAN TERIMA KASIH	liii
BIODATA PENULIS	lv

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konduksi pada bidang datar.....	13
Gambar 2. 2 Konduksi pada dinding berlapis (lebih dari satu bahan).	14
Gambar 2. 3 Analogi perpindahan panas dalam aliran listrik.	14
Gambar 2. 4 Skema metode perpindahan panas.	21
Gambar 2. 5 Pengaruh unsur paduan terhadap kekerasan ferrit. .	30
Gambar 2. 6 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid (kiri) dan kadar karbon dalam eutektoid (kanan).	31
Gambar 2. 7 Pengaruh kadar chrom terhadap luasan daerah austenit.	32
Gambar 2. 8 Pengaruh kadar mangan terhadap daerah austenit. .	32
Gambar 2. 9 Pengaruh kadar chrom terhadap penurunan kekerasan setelah tempering.....	35
Gambar 2. 10 Proses perlakuan panas secara umum.	36
Gambar 2. 11 Diagram hubungan temperatur vs heat treatment pada baja karbon.	39
Gambar 2. 12 Mikrostruktur.	40
Gambar 2. 13 Diagram tahap pendinginan.	45
Gambar 2. 14 Contoh hasil tempering pada baja AISI 4130 (penurunan kekerasan akibat tempering).	49
Gambar 2. 15 Proses quenching-tempering untuk baja karbon... .	50
Gambar 2. 16 Diagram kekerasan martensit (0,026-0,39 %C) yang ditemper pada temperatur 100-700 °C selama 1 Jam.....	52
Gambar 2. 17 (a) Proeutectoid ferrite tumbuh pada butir austenit kecil dan (b) Ferit.	53
Gambar 2. 18 Proses Austemper pada Baja Karbon Eutectoid. .	54
Gambar 2. 19 (a) Proses martempering dan (b) modifikasinya... .	55
Gambar 2. 20 Diagram TTT.	56

Gambar 2. 21 Diagram CCT AISI 1045 (Continuous Cooling Transformation)	57
Gambar 2. 22 Kurva Pendinginan pada Diagram TTT.	58
Gambar 2. 23 Diagram Fasa AISI 1045.	59
Gambar 2. 24 Struktur Kristal BCC.	62
Gambar 2. 25 Struktur Kristal FCC.	62
Gambar 2. 26 Struktur Kristal BCT.	63
Gambar 2. 27 Prosedur analisis menggunakan metode elemen hingga.	69
Gambar 2. 28 Mekanisme pengujian rockwel.	72
Gambar 2. 29 Hubungan antara kekerasan, kadar karbon dan jumlah martensit.	75
Gambar 2. 30 Distribusi kekerasan batang berdiameter 100mm dari beberapa jenis baja.	76
Gambar 2. 31 Kurva pendinginan pada permukaan dan inti batang berdiameter 95 mm yang dicelup (quench) minyak. Permukaan seluruhnya martensit, di inti mengandung juga sedikit bainit.	77
Gambar 2. 32 Distribusi kekerasan batang berbagai diameter, terbuat dari baja O1 setelah dicelup minyak.	78
Gambar 3. 1 Diagram Alir Percobaan	79
Gambar 3. 2 Standar DIN 931.	81
Gambar 3. 3 Hasil pembuatan geometri baut.	82
Gambar 3. 4 Diagram alir pembuatan geometri.	83
Gambar 3. 5 Diagram alir Simulasi.	84
Gambar 3. 6 Input Engineering Data	85
Gambar 3. 7 Standar ISO 898-1	87
Gambar 3. 7 Standar Pengujian Kekerasan ISO 898-1	89
Gambar 4. 1 Distribusi temperatur proses heating pada t = 15 menit.	91
Gambar 4. 2 Distribusi temperatur proses heating pada t = 30 menit.	92

Gambar 4. 3 Distribusi temperatur proses heating pada $t = 60$ menit.	93
Gambar 4. 4 Grafik Distribusi Temperatur Pada Proses Heating	94
Gambar 4. 5 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 5$ s.	95
Gambar 4. 6 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 10$ s.	96
Gambar 4. 7 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 15$ s.	97
Gambar 4. 8 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 20$ s.	98
Gambar 4. 9 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 30$ s.	99
Gambar 4. 10 Grafik Distribusi Temperatur Pada Proses Quenching.	100
Gambar 4. 11 Distribusi temperatur proses heating of tempering.	101
Gambar 4. 12 Grafik distribusi temperatur proses heating of tempering.	102
Gambar 4. 13 Distribusi temperatur proses cooling of tempering.	103
Gambar 4. 14 Temperature austenisasi untuk material S45C. ..	108
Gambar 4. 15 Batas cooling rate minimum material AISI 1045.	115
Gambar 4. 16 Kurva tempering S45C.	116
Gambar 4. 17 Nilai kekerasan martensit berdasarkan kadar karbon.	117
Gambar 4. 18 Nilai kekerasan material 1045 (No. urut 11) berdasarkan data lapangan.	118
Gambar 4. 19 Peninjauan ulang terhadap temperatur pemanasan.	121
Gambar 4. 20 Peninjauan ulang terhadap temperatur tempering.	122

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai konduktivitas bahan.	12
Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Baja AISI 1045.	25
Tabel 2. 3 Perilaku unsur paduan dalam baja.	27
Tabel 2. 4 Macam - macam skala pengujian kekerasan Rockwell.	72
Tabel 3. 1 Komposisi Material Baut (S45C)	80
Tabel 3. 2 Sifat Thermal Baja AISI 1045	80
Tabel 3. 3 Koefisien Konveksi dari Berbagai Proses Laku Panas	90
Tabel 4. 1 Distribusi temperatur pada proses heating.	94
Tabel 4. 2 Distribusi temperatur pada proses quenching.	100
Tabel 4. 3 Distribusi temperatur pada proses heating of tempering.	102
Tabel 4. 4 Distribusi temperatur pada proses cooling of tempering.	104
Tabel 4. 5 Sifat thermal udara pada berbagai temperatur.	105
Tabel 4. 6 Konstanta perhitungan untuk konveksi natural dan nilai koefisien konveksi beberapa material.	106
Tabel 4. 7 Nilai kekerasan dari berbagai mikro struktur	115

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

k	= Konduktivitas termal fluida ($W/m.C$)
A	= Luas penampang (m^2)
L	= Panjang bidang (m)
T	= Temperatur ($^{\circ}K$)
t	= Waktu (s)
R	= Resistivitas (ohm)
Δx	= Tebal Dinding (m)
α	= Absorbtivitas
ρ	= Reflektivitas
τ	= Transmittivitas
E_b	= Daya pancar benda hitam
E	= Daya pancar benda nyata
σ	= Konstanta Stefan Boltzmann

ϵ	= Emisivitas
qr	= Laju perpindahan panas ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_r	= Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
$Nu \phi$	= Nusselt number (Nu):
$(Re) \psi$	= Reynold number
(Pr)	= Prandtl number
δt	= Tebal lapisan batas termal (m)
μ	= Viskositas (Poise)
C_p	= Kapasitas Panas Spesifik ($\text{J/g}^0\text{C}$)
ρ	= Densitas (kg/m^3)
n	= Jumlah butir
σ_y	= Tegangan luluh (MPa)
k	= Konstanta tegangan friksi
d	= Diameter (m)

N_{GR} = Grushof number

g = Percepatan gravitasi bumi (m/s²)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Proses manufaktur merupakan suatu proses pembuatan benda kerja dari bahan baku sampai barang jadi atau setengah jadi dengan atau tanpa proses tambahan dengan mempertimbangkan berbagai aspek antara lain adalah kebutuhan, teknologi dan ekonomi (Widodo Slamet. 2013). Kata manufaktur berasal dari bahasa latin, yaitu *manus* yang memiliki arti tangan (*hand*), *factus* yang memiliki arti membuat (*make*), sehingga pada abad-abad yang lalu proses manufaktur berarti *made by hand* atau dibuat dengan tangan. Namun pada masa modern kata manufaktur lebih diakutkan pada proses permesinan dan control computer.

Adapun proses manufaktur di **PT. Timur Megah Steel** adalah pembuatan produk berupa berbagai jenis baut dan mur. Dalam prosesnya, bahan baku berupa gulungan kawat (*wire rod*) dilakukan proses *pickling* dan *phospating* untuk menghilangkan karat yang ada, kemudian dilakukan proses annealing (untuk beberapa bahan dengan kartu produksi tertentu yaitu: orange, biru, dan ungu) dan ada yang langsung melalui proses *drawing*. Proses *drawing* dilakukan agar ukuran diameter wire rod sesuai dengan ukuran baut yang akan dibuat, hasil pada proses ini disebut dengan *drawn coil*. Untuk pembuatan baut, *drawn coil* dimasukkan pada mesin *bolt forming* yang kemudian dimasukkan ke mesin trimming untuk pembuatan kepala baut, selanjutnya masuk ke mesin rolling untuk pembuatan ulir. Setelah terbentuk, baut ada yang langsung di packing, namun beberapa dilakukan proses laku panas (*heat treatment*) berupa proses pengerasan (*hardening*) dan dilanjutkan dengan *tempering*.



Dalam kasus ini PT. Timur Megah Steel mengalami kegagalan dalam memenuhi standar dalam proses pembuatan baut dengan proses laku panas (*heat treatment*) yang terkhusus pada produk pasar ekspor Eropa. Hal ini disebabkan, standar spesifikasi kadar struktur mikro martensit pada baut yang diharuskan untuk memasuki pasar Eropa adalah tak kurang dari 90%, namun disini masih dibawah angka tersebut.

Salah satu upaya untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah dengan meninjau proses perlakuan panas (*heat treatment*) pada proses pembuatan baut tersebut. Untuk meninjau dan memperbaiki proses perlakuan panas yang terjadi, penulis melakukan pendekatan dengan upaya penelitian terhadap analisis distribusi thermal menggunakan metode elemen hingga pada proses perlakuan panas berupa proses pengerasan (*hardening*) terhadap material baut khusus standarisasi Eropa yaitu DIN 931 M20 x 65 guna mencapai optimasi proses austenisasi dan dapat menghasilkan struktur mikro martensit yang optimal (diatas 90%) melalui peningkatan sifat hardenability dari suatu material.

Baja dengan hardenability tinggi akan memberikan keuntungan bila digunakan untuk membuat benda kerja berpenampang besar yang akan dikeraskan (*hardened & tempered*) sampai ke intinya (*through hardened*). Kekerasan di permukaan dan di intinya tidak banyak berbeda. Keadaan ini diperlukan biasanya pada perkakas, karena perkakas harus cukup kaku, bila pengerasan tidak sampai ke inti maka inti akan terlalu lunak, sehingga bila perkakas itu nanti menerima beban mungkin bagian inti akan mengalami deformasi, hal ini tidak diinginkan. Walaupun kekerasan di permukaan dengan di inti suatu benda kerja yang besar itu sama, tetapi *impact strength* nya dapat berbeda. Hal ini dapat terjadi karena setelah pengerasan dan penemperan, struktur dibagian permukaan akan terdiri dari martensit temper atau martensit temper dan bainit bawah, sedang pada bagian inti strukturnya terdiri dari bainit atas dan atau perlit, yang keduanya



mempunyai *impact strength* lebih rendah dan temperatur transisi lebih tinggi. Pada baut yang di desain menerima tekanan yang besar, semuanya harus terbuat dari baja yang keras sampai ke intinya, bila tidak demikian maka bagian inti yang relatif lunak ini akan terdeformasi dan bagian permukaan akan menerima tekanan yang berlebihan sehingga akan mudah rusak (Avner.1974).

Dalam proses perpindahan panas, logam dan mineral sangat bergantung pada sifat bahan tersebut, seperti koefisien konveksi, emisivitas, konduktivitas, kapasitas thermal dan densitas material. Perambatan ini mengakibatkan terciptanya generasi panas, pemanasan yang tidak merata masih sering dijumpai dan hal ini menyebabkan terjadinya *overheating* atau terbakarnya beberapa bagian dari material (Acevedo, 2015). Kondisi ini diakibatkan oleh adanya panas yang terkumpul pada satu titik sehingga terdapat daerah yang terbakar dan di daerah lain temperaturnya minimum. Selain itu, penyebaran panas yang tidak merata juga dapat mempengaruhi fasa yang terjadi di dalam material. Jika terjadi perbedaan temperatur terlalu signifikan pada beberapa daerah di dalam logam atau mineral, maka fasa yang ingin dicapai setelah proses pemanasan tidak akan tercapai seluruhnya dan hal ini akan mengakibatkan sifat dari produk akhir sangat berbeda jauh dari yang diharapkan (Chandrasekaran, 2011).

Karena kompleksnya tantangan dalam proses perpindahan panas pada logam dan mineral, simulasi numerik dan pemodelan matematis menjadi salah satu metode yang diperlukan dalam membantu para-peneliti untuk mengobservasi, mengontrol dan memprediksi fenomena yang terjadi, terutama untuk memahami terjadinya pemanasan yang tidak merata dalam sistem pemanasan. Analisis dengan menggunakan Metode Elemen Hingga merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk menyelesaikan dan memberikan solusi atas permasalahan tersebut. Metode Elemen Hingga merupakan metode yang tepat untuk meneliti fenomena yang terjadi selama proses pemanasan karena lebih



fleksibel dan lebih menguntungkan ketika benda dengan geometri yang kompleks diaplikasikan.

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan sebagai objek studi adalah material berbentuk baut dengan standar DIN 931 M20 x 65. Proses distribusi temperatur pada material ini disimulasikan dengan menggunakan aplikasi ANSYS yang berprinsip pada metode elemen hingga. Aplikasi ANSYS dipilih karena lebih efisien dan dapat digunakan dalam berbagai disiplin ilmu keteknikan (Madenci, 2015).

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang digunakan dalam penelitian antara lain:

1. Bagaimana prosedur simulasi distribusi temperatur akibat proses pengerasan (*hardening process*) dalam objek berbentuk baut?
2. Bagaimana analisis distribusi temperatur terhadap struktur mikro martensit yang dihasilkan untuk material baut akibat proses pengerasan (*hardening process*)?
3. Bagaimana analisis distribusi temperatur terhadap nilai kekerasan yang didapatkan untuk material baut akibat proses pengerasan (*hardening process*)?

I.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dikhususkan pada material baut standarisasi ekspor Eropa yaitu DIN 931 M20.
2. Penelitian difokuskan pada proses perlakuan panas untuk pengerasan (*hardening*) dikarenakan proses ini memiliki andil yang besar terhadap terbentuknya martensit.



3. Perpindahan panas yang terjadi ditinjau berdasarkan perpindahan panas secara konveksi dan konduksi untuk kedua kondisi proses yaitu *heating*, *quenching* dan *tempering*.
4. Pada proses *heating*, nilai koefisien konveksi adalah berdasarkan jenis natural konveksi atau konveksi bebas pada udara di temperatur 850°C , yaitu sebesar $11,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dan pada proses ini, temperatur awal pada benda kerja adalah 35°C dengan temperatur lingkungan (udara) sebesar 850°C . Proses distribusi temperatur secara transient dan diamati pada waktu 15 menit, 30 menit dan 1 jam.
5. Pada proses *quenching*, nilai koefisien konveksi adalah berdasarkan jenis konveksi paksa pada oli karena agitasi, yaitu sebesar $1.250 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pada proses ini, temperatur awal pada benda kerja tidak merata, karena diambil dari keadaan akhir dari proses sebelumnya yaitu *heating* dan dengan temperatur lingkungan (oli) sebesar 55°C . Proses distribusi temperatur secara transient dan diamati pada waktu 5 detik, 10 detik 15 detik, 20 detik dan 30 detik.
6. Pada proses *heating tempering*, nilai koefisien konveksi adalah berdasarkan jenis natural konveksi atau konveksi bebas pada udara di temperatur 450°C , yaitu sebesar $10,31 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pada proses ini, temperatur awal pada benda kerja dianggap 55°C (meskipun seharusnya temperatur awal benda kerja seharusnya tidak merata, yaitu berdasarkan nilai dari proses sebelumnya atau *quemching*, karena untuk menyederhanakan perhitungan nilai koefisien konveksi pada proses). Dan dengan temperatur lingkungan (udara) sebesar 450°C . Proses distribusi temperatur secara transient dan diamati pada waktu 30 menit.



7. Pada proses *cooling tempering*, nilai koefisien konveksi adalah berdasarkan jenis natural konveksi atau konveksi bebas pada udara di temperatur 35°C , yaitu sebesar $10,49 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pada proses ini, temperatur awal pada benda kerja dianggap 450°C (meskipun seharusnya temperatur awal benda kerja seharusnya tidak merata, yaitu berdasarkan nilai dari proses sebelumnya atau *heating tempering*, karena untuk menyederhanakan perhitungan nilai koefisien konveksi pada proses). Dan dengan temperatur lingkungan (udara) sebesar 35°C .
8. Pengaruh pada proses dibatasi pada hasil kadar struktur mikro martensit dari nilai kekerasan yang dihasilkan setelah quenching dan setelah melalui proses tempering.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian adalah:

1. Menentukan prosedur simulasi distribusi temperatur akibat proses pengerasan (*hardening process*) dalam objek berbentuk baut.
2. Menyelidiki dan menganalisis distribusi temperatur terhadap struktur mikro martensit yang dihasilkan untuk material baut akibat proses pengerasan (*hardening process*).
3. Menyelidiki dan menganalisis distribusi temperatur terhadap nilai kekerasan yang didapatkan untuk material baut akibat proses pengerasan (*hardening process*).



I.5 Manfaat Penelitian

Dengan penelitian ini diharapkan dapat diketahui informasi distribusi temperatur akibat proses pengerasan (*hardening process*) dalam objek berbentuk baut dan meninjau apakah temperature proses tersebut sudah optimum untuk mencapai temperature austenisasi dari material baut untuk dapat diaplikasikan sebagai rekomendasi teknik di dalam proses manufaktur baut guna optimasi prosedur pengerasan, terkhusus pada baut ekspor Eropa di **PT. Timur Megah Steel** guna mencapai standarisasi batas kadar struktur mikro martensit ($>90\%$), serta memberikan kontribusi dalam bidang simulasi dan permodelan khususnya dalam proses manufaktur menggunakan perlakuan panas, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai referensi penelitian berikutnya khususnya di Teknik Material dan Metalurgi ITS.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II. 1 Proses Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah ilmu untuk mengasumsikan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Menurut aspek termodinamika, diketahui bahwa energi yang berpindah adalah kalor atau panas (*heat*). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya menjelaskan tentang bagaimana energi kalor itu berpindah dari suatu benda ke benda lain, tetapi juga memperkirakan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Termodinamika membahas sistem dalam keseimbangan, ilmu ini dapat digunakan untuk mengasumsikan energi yang diperlukan untuk mengubah sistem dari suatu keadaan seimbang ke keadaan seimbang lain, tetapi tidak dapat mengasumsikan kecepatan atau laju dari perpindahan itu. Hal ini disebabkan karena pada waktu proses perpindahan itu berlangsung, sistem tidak berada dalam keadaan seimbang. Ilmu perpindahan kalor melengkapi hukum pertama dan kedua dari termodinamika, yaitu dengan memberikan beberapa kaidah percobaan yang dapat dimanfaatkan untuk menentukan perpindahan energi. Sebagaimana juga dalam ilmu termodinamika, kaidah-kaidah percobaan yang digunakan dalam masalah perpindahan kalor cukup sederhana, dan dapat dengan mudah dikembangkan sehingga mencakup berbagai ragam situasi praktis. (Holman,1983).

Perpindahan panas dibagi menjadi tiga, yaitu konduksi, radiasi dan konveksi. Perpindahan kalor konduksi adalah perpindahan tenaga sebagai kalor melalui sebuah proses medium stasioner, seperti tembaga, air, atau udara. Di dalam benda-benda padat maka perpindahan tenaga timbul karena atom-atom pada temperatur yang lebih tinggi bergetar dengan lebih agresif, sehingga atom-atom tersebut dapat memindahkan tenaga kepada



atom-atom yang lebih lemah yang berada di dekatnya dengan kerja mikroskopik, yakni kalor. Di dalam logam-logam, elektron-elektron bebas juga berkontribusi pada proses perambatan kalor. Sementara itu, dalam sebuah cairan atau gas, molekul-molekul juga bersifat agresif (mudah bergerak), dan tenaga juga dihantar oleh tumbukan-tumbukan molekul. (Reynold dan Perkins, 1983).

Perpindahan kalor konduksi satu dimensi melalui padatan diatur oleh hukum Fourier, yang dalam bentuk satu dimensi dapat dinyatakan sebagai,

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Dimana, q adalah arus panas, k adalah konduktivitas termal medium, A adalah penampang luas untuk aliran panas, dan dT / dx adalah gradien temperatur, membutuhkan penyisipan tanda minus di persamaan (2.1) untuk menjamin panas positif aliran q . Perbedaan temperatur yang dihasilkan dari difusi *steady-state* panas dengan demikian berkaitan dengan konduktivitas termal dari material, luas penampang A , dan panjang jalur L , menjadi,

$$(T_1 - T_2)cd = q \frac{L}{kA} \quad (2.2)$$

Bentuk persamaan (2.2), dimana k dan A adalah konstan, menunjukkan bahwa dengan cara yang analog dengan hukum Ohm mengatur aliran arus listrik melalui hambatan adalah mungkin untuk menentukan hambatan konduktivitas termal.

$$Rcd = \frac{T_1 - T_2}{kA} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.1) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Untuk gas-gas pada temperatur agak rendah, pengolahan analitis teori kinetik gas dapat dipergunakan untuk meramalkan secara teliti nilai-nilai yang



diamati dalam percobaan. (Bejan dan Kraus, 1948).

Mekanisme konduksi termal pada gas cukup sederhana. Energi kinetik molekul ditunjukkan oleh temperaturnya, jadi pada bagian bertemperatur tinggi molekul- molekul mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada yang berada pada bagian bertemperatur rendah. Molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang atau acak, saling bertumbukkan satu sama lain, di mana terjadi pertukaran energi dan momentum. Jika suatu molekul bergerak dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah, maka molekul itu mengangkut energi kinetik ke bagian sistem yang temperaturnya lebih rendah, dan di sini menyerahkan energinya pada waktu bertumbukkan dengan molekul yang energinya lebih rendah. Jika aliran kalor dinyatakan dalam watt, satuan untuk konduktivitas termal itu ialah watt per meter per derajat Celsius. Nilai konduktivitas termal itu menunjukkan berapa cepat kalor mengalir dalam bahan tertentu.

Energi termal dihantarkan dalam zat padat menurut salah satu dari dua modus berikut melalui getaran kisi (*lattice vibration*) atau dengan angkutan melalui elektron bebas. Dalam konduktor listrik yang baik, dimana terdapat elektron bebas yang bergerak di dalam struktur kisi bahan-bahan, maka elektron, di samping dapat mengangkut muatan listrik, dapat pula membawa energi termal dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah, sebagaimana halnya dalam gas. Energi dapat pula berpindah sebagai energi getaran dalam struktur kisi bahan. Namun, pada umumnya perpindahan energi melalui getaran ini tidaklah sebanyak dengan cara angkutan elektron. Karena itu penghantar listrik yang baik selalu merupakan penghantar kalor yang baik pula, seperti halnya tembaga, aluminium dan perak. Sebaliknya isolator listrik yang baik merupakan isolator kalor. (Holman, 1983)

Nilai konduktivitas thermal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Konduktivitas thermal kebanyakan bahan merupakan fungsi temperatur, dan bertambah sedikit kalau temperatur naik, akan tetapi variasinya kecil dan sering kali diabaikan. Jika nilai



konduktivitas thermal suatu bahan makin besar, maka makin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut. Karena itu, bahan yang harga k -nya besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila k -nya kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator.

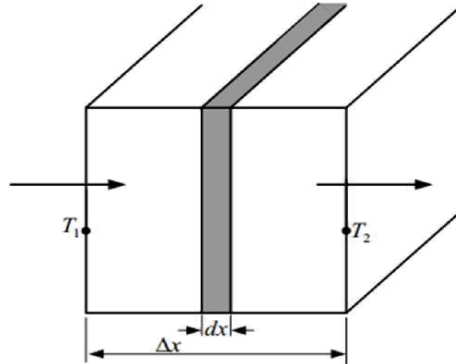
Tabel 2. 1 Nilai konduktivitas bahan.

Bahan	k (W/m.C)	Bahan	k (W/m.C)
Logam		Non Logam	
Perak	410	Kuarsa	41,6
Tembaga	385	Magnesi	4,15
Aluminiu	202	Marmar	2,08 – 2,94
m	93	Batu pasir	1,83
Nikel	73	Kaca, jendela Kayu	0,78
Besi	43	Serbuk gergaji Wol	0,08
Baja	35	Kaca	0,059
karbon	16,3	Karet	0,038
Timbal	314	Polystyrene	0,2
Baja		Polyethylene	0,157
Krom-nikel		Polypropylene	0,33
Emas		Polyvinyl Chlorida	0,16
		Kertas	0,09
			0,166
Zat cair		Gas	
Air raksa	8,21	Hidrogen	0,175
Air	0,556	Helium	0,141
Amonia	0,540	Udara	0,024
Minyak lumas	0,147	Uap air (jenuh)	0,0206
SAE 50			
Freon 12	0,073	Karbondioksida	0,0146

(Yoga Pratama. 2015)



Perpindahan panas pada suatu dinding datar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, dapat diturunkan dengan menerapkan Persamaan 2.1.



Gambar 2. 1 Konduksi pada bidang datar.

(Yoga Pratama. 2015)

Jika Persamaan 2.1 diintegrasikan:

$$\int q dx = - \int k A dx \quad (2.4)$$

Maka akan diperoleh:

$$Q \Delta x = -k A \Delta T \quad (2.5)$$

$$Q = - \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

dimana:

T_1 = Temperatur Dinding Sebelah Kiri ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = Temperatur Dinding Sebelah Kanan ($^{\circ}\text{C}$)

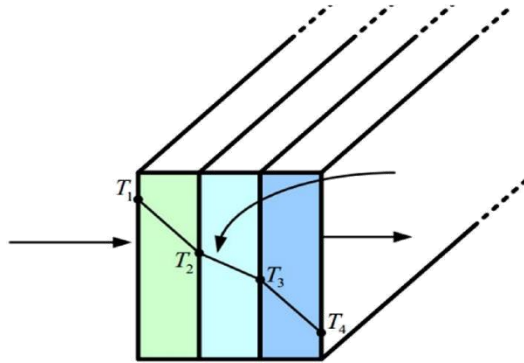
Δx = Tebal Dinding (m)

Apabila pada suatu sistem terdapat lebih dari satu macam



bahan, misalnya dinding berlapis-lapis (gambar 2.2), maka aliran kalor dapat digambarkan sebagai berikut:

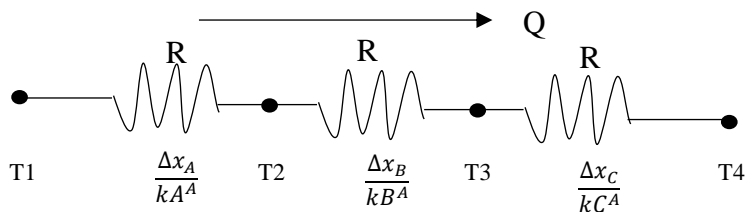
$$Q = -\frac{kA^A}{\Delta x_A}(T_2 - T_1) = -\frac{kB^A}{\Delta x_B}(T_3 - T_2) = -\frac{kC^A}{\Delta x_C}(T_4 - T_3) \quad (2.7)$$



Gambar 2. 2 Konduksi pada dinding berlapis (lebih dari satu bahan).

(Yoga Pratama. 2015)

Persamaan 2.5 mirip dengan Hukum Ohm dalam aliran listrik. Dengan demikian perpindahan panas dapat dianalogikan dengan aliran arus listrik seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Analogi perpindahan panas dalam aliran listrik.

(Yoga Pratama. 2015)



Menurut analogi di atas perpindahan panas sama dengan:

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\Sigma R_{th}} \quad (2.8)$$

Jadi persamaan 2.5 dipecahkan serentak, maka aliran panas adalah:

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}} \quad (2.9)$$

Sehingga persamaan Fourier dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Aliran panas} = \frac{\text{Beda Potensial Panas}}{\text{Tahanan Thermal}} \quad (2.10)$$

Harga tahanan termal total R_{th} tergantung pada susunan dinding penyusunnya, apakah bersusun seri atau paralel atau gabungan.

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan tenaga oleh penjaralan (rambatan) foton yang tak terorganisir. Setiap benda yang terus memancarkan foton-foton secara serampangan di dalam arah dan waktu, dan tenaga netto yang dipindahkan oleh foton-foton ini diperhitungkan sebagai kalor. Bila foton-foton ini berada di dalam jangkauan panjang gelombang 0,38 sampai 0,76 μm , maka foton-foton tersebut mempengaruhi mata kita sebagai sinar cahaya yang tampak (dapat dilihat). Bertentangan dengan itu, maka setiap tenaga foton yang terorganisir, seperti transmisi radio, dapat diidentifikasi secara mikroskopik dan tak dipandang sebagai kalor. (Reynold dan Perkins, 1983).

Bila foton-foton yang diradiasikan mencapai permukaan lain, maka foton-foton tersebut baik diserap, direfleksikan, maupun diteruskan melalui permukaan tersebut. Tiga sifat-sifat permukaan yang mengukur kuantitas-kuantitas ini adalah:

- a. α absorptivitas, bagian radiasi yang masuk yang diserap.
- b. ρ reflektivitas, bagian radiasi yang masuk yang direfleksikan.
- c. τ transmittivitas, bagian radiasi yang masuk yang



ditransmisikan.

Dari pertimbangan-pertimbangan tenaga maka,

$$\alpha + \rho + \tau = 0 \quad (2.11)$$

Tenaga yang direfleksikan tersebut dapat merupakan difusi (*diffuse*), dimana refleksi tak bergantung dari sudut radiasi yang masuk, maupun merupakan spekular (*specular*), di mana sudut refleksi menyamai sudut masuk. Kebanyakan permukaan teknik menunjukkan kombinasi kedua jenis refleksi tersebut. Fluks radiasi tenaga [Btu/(h.ft²)] dari sebuah permukaan didefinisikan sebagai daya pancar (*emissive power*) E . Pertimbangan termodinamika memperlihatkan bahwa E adalah sebanding dengan pangkat 4 dari temperatur absolute.

Untuk sebuah benda dengan $\alpha = 1$, $\rho = \tau = 0$ (sebuah benda hitam),

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.12)$$

dimana σ adalah konstanta Stefan Boltzmann,

$$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}^4 = 0,1714 \cdot 10^{-8} \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4) \quad (2.13)$$

Oleh karena itu benda nyata tidak berwarna “hitam”, benda tersebut memancarkan energi yang lebih sedikit dibandingkan dengan suatu benda hitam pada temperatur yang sama. Perbandingan antara daya pancar nyata terhadap daya pancar benda hitam dinyatakan dengan *emisivitas* ϵ , di mana:

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.14)$$

dengan,

E = Daya pancar benda nyata

E_b = Daya pancar benda hitam

Pada banyak bahan, emisivitas dan absorbtivitas dapat dianggap sama. Bahan ini dikelompokkan ke dalam benda kelabu (*gray bodies*), dan



$$\epsilon = \alpha \quad (2.15)$$

Ciri khas pertukaran energi radiasi yang penting lagi adalah sifatnya yang menyebar secara merata ke segala arah. Karena itu hubungan geometric antara kedua permukaan akan mempengaruhi pertukaran energi radiasinya. Hubungan geometri dapat diterangkan dan dihitung dengan memperhatikan faktor bentuk F_A (Reynold dan Perkins, 1983).

Untuk perbedaan temperatur, persamaan (2.8) dapat ditulis dalam bentuk,

$$qr = h_r S (T_1 - T_2) \quad (2.16)$$

dimana h_r ($W/m^2.K$) adalah koefisien perpindahan panas radiasi. (Bejan dan Kraus, 1948).

Perpindahan kalor konveksi adalah apabila sebuah fluida melewati di atas sebuah permukaan padat panas, maka tenaga dipindahkan kepada fluida dari dinding oleh panas hantaran. Tenaga ini kemudian diangkut atau dikonveksikan (*convected*), ke hilir oleh fluida, dan didifusikan melalui fluida oleh hantaran di dalam fluida tersebut. Jenis proses perpindahan tenaga ini dinamakan perpindahan tenaga konveksi (*convection heat transfer*) (Stoecker dan Jones, 1982).

Jika proses aliran fluida tersebut diinduksikan oleh sebuah pompa atau sistem pengedar (*circulating system*) yang lain, maka digunakan istilah konveksi yang dipaksakan (*forced convection*). Bertentangan dengan itu, jika aliran fluida timbul karena daya apung fluida yang disebabkan oleh pemanasan, maka proses tersebut dinamakan konveksi bebas (*free*) atau konveksi alami (*natural*). Persamaan dasar untuk menghitung laju perpindahan panas konveksi yaitu,

$$q = hA (T_w - T_f) \quad (2.17)$$

dimana,

q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.K$)



A = Luas Penampang (m^2)

T_w = Temperatur Dinding ($^{\circ}C$)

T_f = Temperatur Fluida ($^{\circ}C$)

Dimana koefisien perpindahan panas konveksi h_c dapat dihitung dari bilangan Nusselt (Nu):

$$Nu = h_c \cdot Dh \cdot k \quad (2.18)$$

Dalam praktek perekayasaan harga bilangan Nusselt biasanya ditentukan dari nilai-nilai empirik berdasarkan hasil eksperimen. Hasil-hasil eksperimen yang diperoleh dari eksperimen konveksi paksa dapat dikorelasikan dengan persamaan:

$$Nu = \phi(Re)\psi(Pr) \quad (2.19)$$

Dimana simbol ϕ dan ψ menandakan fungsi bilangan Reynold dan bilangan Prandtl. Koefisien perpindahan panas konveksi (h_c) yang digunakan untuk membentuk bilangan Nusselt bagi perpindahan panas dari dinding saluran ke fluida yang melewatinya bergantung pada pemilihan temperatur acuan fluida. Untuk fluida yang mengalir pada permukaan datar temperatur fluida yang jauh dari panas umumnya konstan. Jenis aliran laminar apabila nilai bilangan Reynolds di bawah 2.100. Dan termasuk jenis aliran peralihan dari laminar ke turbulen apabila harga bilangan Reynolds berkisar antara 2.100 sampai 10.000. Untuk bilangan Reynolds di atas 10000 aliran menjadi turbulen penuh.

Jika sebuah pelat datar berada dalam keadaan diam ditempatkan di dalam aliran fluida yang kecepatannya U_{∞} dan sejajar dengan pelat tersebut maka aliran fluida dekat permukaan pelat akan diperlambat akibat pengaruh viskositas fluida. Kecepatan fluida pada permukaan pelat adalah nol dan kecepatan fluida yang berada jauh dari pelat adalah U_{∞} . Daerah dekat pelat



yang dipengaruhi oleh viskositas dinamakan lapisan batas hidrodinamik.

Apabila terdapat perbedaan temperatur antara pelat dengan fluida maka selain lapisan batas hidrodinamik akan terdapat pula lapisan batas termal. Temperatur fluida yang berada pada permukaan pelat sebesar T_w dan temperatur yang berada jauh dari pelat besarnya adalah T_∞ . Tebal lapisan batas termal δ_t didefinisikan sebagai jarak dari pelat kesuatu titik yang temperaturnya mencapai 99 % dari harga T_∞ .

Untuk lapisan batas laminar di atas pelat datar dengan kecepatan aliran utama konstan dan temperatur pelat seragam maka diperoleh persamaan:

$$hcx = 1,66k/\delta_t \quad (2. 20)$$

dimana,

hcx = koefisien perpindahan panas konveksi lokal

k = konduktivitas termal fluida

δ_t = tebal lapisan batas termal

Persamaan ini menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas konveksi akan meningkat apabila tebal lapisan batas berkurang. Pengisapan pada pelat datar akan mempengaruhi tebal lapisan batas. Dengan berkurangnya tebal lapisan batas, koefisien perpindahan panas konveksi akan meningkat. Apabila suatu fluida berada di atas permukaan benda, distribusi kecepatan dan temperatur dari permukaan mempengaruhi perpindahan panas secara konveksi.

Berbagai pendekatan yang lazim dilakukan untuk gejala perpindahan panas konveksi paksa turbulen didasarkan atas analogi antara perpindahan energi dengan perpindahan momentum. Pendekatan dengan hakekat yang disederhanakan telah dijabarkan dengan pemisalan teoritik, dikenal dengan analogi Reynolds dihasilkan dengan menganggap bahwa mekanisme fluks energi identik dengan mekanisme fluks momentum bagi aliran



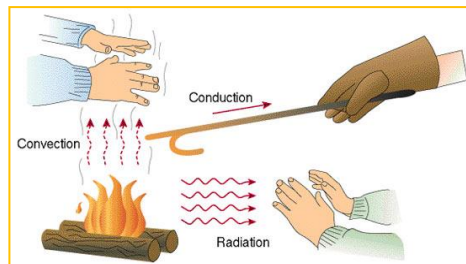
fluida yang turbulen dengan ketentuan bilangan Prandtl turbulen (Pr) sama dengan satu. Dalam hal ini mekanisme transpor energi dan momentum diabaikan karena pengaruhnya sangat kecil.

Aliran turbulen mempunyai kecepatan yang tidak teratur, berfluktuasi dalam ruang dan waktu. Ketidakteraturan arah dan derajat fluktuasi kemudian digambarkan sebagai faktor pusaran dalam kegiatan turbulen. Pola aliran turbulen yang sudah mantap apabila diamati dari acuan yang bergerak mengikuti aliran dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan pusaran yang kecil mulai tumbuh dari daerah bertegangan geser besar dengan intensitas yang tinggi. Komponen pusaran tersebut kemudian berdifusi ke dalam inti aliran dengan intensitas yang semakin merosot. Dalam perjalanannya ke inti aliran, pusaran-pusaran kecil bisa berkelompok menjadi pusaran yang lebih besar. Dengan berubahnya waktu, gumpalan-gumpalan fluida berpindah dan berinteraksi satu dengan yang lain dengan bercampur aduk. Cara interaksi fluida semacam ini merupakan media perpindahan yang baik bagi perpindahan panas, sehingga koefisien perpindahan panasnya lebih besar dibandingkan dengan perpindahan panas dalam aliran laminar yang berlangsung dengan mekanisme perpindahan molekular. Selanjutnya Reynold menganggap bahwa pada aliran turbulen pengaruh difusivitas dan viskositas molekular diabaikan, dengan kata lain hanya mekanisme turbulen yang dominan. Setelah dilakukan berbagai pengujian, ternyata hasil analogi Reynold memberikan prediksi yang cukup baik, tetapi terbatas hanya pada fluida yang bilangan Prandtl-nya mendekati satu ($Pr=1$). Walaupun hasil yang diperoleh mempunyai kisaran Pr yang terbatas, analogi antara perpindahan panas dengan perpindahan momentum dapat diusulkan sebagai pendekatan untuk gejala perpindahan panas konveksi paksa pada aliran turbulen.

Konsep yang digunakan untuk mencari koefisien perpindahan panas konveksi adalah didasarkan kepada dua mekanisme perpindahan panas yaitu perpindahan panas secara



konduksi dan perpindahan panas secara konveksi. Banyak parameter yang mempengaruhi perpindahan kalor konveksi di dalam sebuah geometri khusus. Parameter-parameter ini termasuk skala panjang sistem (L), konduktivitas termal fluida (k), biasanya kecepatan fluida (V), kerapatan (ρ), viskositas (μ), panas jenis (C_p), dan kadang-kadang faktor lain yang berhubungan dengan cara-cara pemanasan (temperatur dinding uniform atau temperatur dinding berubah-ubah). Fluks kalor dari permukaan padat akan bergantung juga pada temperatur permukaan (T_s) dan temperatur fluida (T_f), tetapi biasanya dianggap bahwa ($\Delta T = T_s - T_f$). Akan tetapi, jika sifat-sifat fluida berubah dengan nyata pada daerah pengkonveksi (*convection region*), maka temperatur-temperatur absolute T_s dan T_f dapat juga merupakan faktor-faktor penting didalam korelasi. Jelaslah bahwa dengan sedemikian banyak variable-variabel penting, maka korelasi spesifik akan sulit dipakai, dan sebagai konsekuensinya maka korelasi-korelasi biasanya disajikan dalam pengelompokkan-pengelompokkan tak berdimensi (*dimensionless groupings*) yang mengizinkan representasi-representasi yang jauh lebih sederhana. Juga faktor-faktor dengan pengaruh yang kurang penting, seperti variasi sifat fluida dan distribusi temperatur dinding, seringkali diabaikan untuk menyederhanakan korelasi-korelasi tersebut. (Stoecker dan Jones, 1982).



Gambar 2. 4 Skema metode perpindahan panas.

(Bayu Wijaya. 2012)



II. 2 Baja Karbon

Baja adalah logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C), dimana besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0,1% hingga 1,7% sesuai tingkatannya. Dalam proses pembuatan baja akan terdapat unsur-unsur lain selain karbon yang akan tertinggal di dalam baja seperti mangan (Mn), silikon (Si), kromium (Cr), vanadium (V), dan unsur lainnya. Berdasarkan komposisi dalam prakteknya baja terdiri dari beberapa macam yaitu: Baja Karbon (*Carbon Steel*), dan Baja Paduan (*Alloy Steel*) (Callister, 2007).

Baja karbon terdiri dari besi dan karbon. Karbon merupakan unsur penguat besi yang efektif dan murah dan oleh karena itu umumnya sebagian besar baja hanya mengandung karbon dengan sedikit unsur paduan lainnya (Smallman, 1991).

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang paling umum di gunakan dan yang paling banyak di produksi dalam jumlah yang besar. Kadar karbon baja ini kurang dari 0,25%, serta struktur mikronya terdiri atas ferrit dan sedikit perlit., sehingga baja ini memiliki sifat yang lunak , tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang sangat baik. Baja ini dapat dimesin dan dilas, tetapi tidak responsive terhadap perlakuan panas. Artinya, baja ini tidak membentuk struktur martensit ketika didinginkan dengan cepat. Baja ini juga tidak dapat dikeraskan (kecuali dengan pengerasan permukaan). Beberapa aplikasi dari baja ini, seperti bodi mobil, serta lembaran baja untuk pipa, kaleng, serta bentuk structural (Bondan T., 2011).

Kelompok lain dari baja karbon rendah adalah baja paduan rendah berkekuatan tinggi atau yang dikenal juga sebagai baja HSLA. Kelompok baja ini mengandung unsur paduan seperti tembaga, vanadium, nikel, dan molybdenum yang totalnya dapat mencapai 10%. Kekuatannya jauh lebih tinggi daripada baja karbon rendah biasa. Kekuatannya dapat mencapai 480 MPa dan umumnya lebih tahan korosi. Aplikasi baja HSLA seperti jembatan, menara, pressure vessel, dan lain-lain. Baja karbon rendah juga ada yang



dibagi menjadi kelompok lain , yang kadar karbonnya sangat rendah , kurang dari 0,15% , sebagai *Dead Mild Steel*, yang biasanya digunakan untuk baja lembaran, besi beton, besi strip dan lain-lain (Bondan T. 2011).

II. 2.1 Klasifikasi Baja Karbon

Berdasarkan tinggi rendahnya presentase karbon di dalam baja, baja karbon diklasifikasikan sebagai berikut (Callister, 2007):

1. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*) mengandung karbon antara 0,10 s/d 0,30 %. Baja karbon ini dalam perdagangan dibuat dalam plat baja, baja strip dan baja batangan atau profil.
2. Baja Karbon Menengah (*Medium Carbon Steel*) mengandung karbon antara 0,30% - 0,60%. Baja karbon menengah ini banyak digunakan untuk keperluan alat-alat perkakas bagian mesin juga dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti untuk keperluan industri kendaraan, roda gigi, pegas dan sebagainya.
3. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*) mengandung kadar karbon antara 0,60% - 1,7%. Baja ini memiliki tegangan tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material tools. Salah satu aplikasi dari baja ini adalah dalam pembuatan kawat baja dan kabel baja. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung didalam baja maka baja karbon ini banyak digunakan dalam pembuatan pegas, alat-alat perkakas seperti: palu, gergaji atau pahat potong

II. 2.2 Sifat Mekanik Baja

Sifat mekanik suatu bahan adalah kemampuan bahan untuk menahan beban-beban yang dikenakan padanya. Beban-beban tersebut dapat berupa beban tarik, tekan, bengkok, geser, puntir, atau beban kombinasi. Sifat-sifat mekanik yang terpenting antara lain (Callister, 2007):

1. Kekuatan (*strength*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan



tersebut menjadi patah. Kekuatan ini ada beberapa macam, dan ini tergantung pada beban yang bekerja antara lain dapat dilihat dari kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan puntir, dan kekuatan bengkok.

2. Kekerasan (*hardness*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk bertahan terhadap goresan, pengikisan (abrasi), penetrasi. Sifat ini berkaitan erat dengan sifat keausan (*wear resistance*). Dimana kekerasan ini juga mempunyai korelasi dengan kekuatan.
3. Kekenyalan (*elasticity*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan. Kekenyalan juga menyatakan seberapa banyak perubahan bentuk yang permanen mulai terjadi, dengan kata lain kekenyalan menyatakan kemampuan bahan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah menerima beban yang menimbulkan deformasi.
4. Kekakuan (*stiffness*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan/beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) atau defleksi. Dalam beberapa hal kekakuan ini lebih penting daripada kekuatan.
5. Plastisitas (*plasticity*) menyatakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi plastis yang permanen tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan. Sifat ini sangat diperlukan bagi bahan yang akan diproses dengan berbagai proses pembentukan seperti, forging, rolling, extruding dan sebagainya. Sifat ini sering juga disebut sebagai keuletan/kekenyalan (*ductility*).
6. Ketangguhan (*toughness*) menyatakan kemampuan bahan untuk menyerap sejumlah energi tanpa



mengakibatkan terjadinya kerusakan. Juga dapat dikatakan sebagai ukuran banyaknya energi yang diperlukan untuk mematahkan suatu benda kerja, pada suatu kondisi tertentu. Sifat ini dipengaruhi oleh banyak faktor, sehingga sifat ini sulit untuk diukur.

7. Kelelahan (*fatigue*) merupakan kecenderungan dari logam untuk patah apabila menerima tegangan berulang-ulang (*cyclic stress*) yang besarnya masih jauh dibawah batas kekuatan elastisitasnya. Sebagian besar dari kerusakan yang terjadi pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan. Karenanya kelelahan merupakan sifat yang sangat penting tetapi sifat ini juga sulit diukur karena sangat banyak faktor yang mempengaruhinya.
8. Keretakan (*creep*) merupakan kecenderungan suatu logam mengalami deformasi plastis yang besarnya merupakan fungsi waktu, pada saat bahan tersebut menerima beban yang besarnya relatif tetap.

II. 3 Baja AISI 1045

Baja AISI 1045 atau dalam standar *Japan Industrial Standard* (JIS) adalah baja S45C adalah baja karbon yang mempunyai kandungan karbon sekitar 0,43 - 0,50 dan termasuk golongan baja karbon menengah [Glyn.et.al, 2001]. Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponen automotif misalnya untuk komponen roda gigi pada kendaraan bermotor. Komposisi kimia dari baja AISI 1045 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Baja AISI 1045.

Kode	Kadar (%)					
	C	Si	Mn	Mo	P	S
AISI 1045	0,40-0,45	0,10-0,30	0,60-0,90	0,025	0,04 max	0,05 max

(<http://www.strindustries.com>, 2006)

Baja AISI 1045 disebut sebagai baja karbon karena sesuai dengan pengkodean internasional, yaitu seri 10xx berdasarkan



nomenklatur yang dikeluarkan oleh AISI dan SAE (*Society of Automotive Engineers*). Pada angka 10 pertama merupakan kode yang menunjukkan *plain carbon* kemudian kode xxx setelah angka 10 menunjukkan komposisi karbon [Glyn.*et.al*, 2001]. Jadi baja AISI 1045 berarti baja karbon atau *plain carbon steel* yang mempunyai komposisi karbon sebesar 0,45%. Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponen roda gigi, poros dan bantalan. Pada aplikasinya ini baja tersebut harus mempunyai ketahanan aus yang baik karena sesuai dengan fungsinya harus mampu menahan keausan akibat bergesekan dengan rantai. Ketahanan aus didefinisikan sebagai ketahanan terhadap abrasi atau ketahanan terhadap pengurangan dimensi akibat suatu gesekan [Avner, 1974]. Pada umumnya ketahanan aus berbanding lurus dengan kekerasan (Agus Pramono. 2011).

II. 4 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja

Baja karbon biasanya sudah cukup memuaskan untuk digunakan bila persyaratan kekuatan, keuletan dan lain-lain tidak terlalu tinggi, baja karbon juga cukup baik untuk digunakan pada temperature kamar dan pada kondisi lingkungan yang tidak terlalu korosif. Harganya pun relative murah. Tetapi dalam beberapa hal baja karbon tidak memenuhi syarat untuk dipergunakan.

Baja karbon dapat mencapai kekuatan yang tinggi, dengan menaikkan kadar karbonnya, tetapi ini sangat menurunkan keuletan dan ketangguhannya. Kekuatannya akan banyak berkurang bila bekerja pada temperature yang agak tinggi. Pada temperature rendah ketangguhannya akan menurun secara drastis. Baja karbo pada umumnya memiliki hardenability yang cukup rendah, dan setelah pengerasan mudah menjadi lunak kembali bila mengalami pemanasan. Hal-hal ini sering merupakan hambatan atau kesulitan dalam penggunaan baja karbon.

Dengan menambahkan satu atau beberapa unsur paduan tertentu maka banyak diantara kesulitan tersebut dapat teratasi. Baja dengan tambahan beberapa unsur paduan dinamakan dengan baja paduan. Unsur paduan sengaja ditambahkan untuk mencapai salah satu atau beberapa dari tujuan berikut:



- a. Meningkatkan hardenability.
- b. Memperbaiki kekuatan pada temperature biasa.
- c. Memperbaiki sifat mekanik pada temperature rendah atau tinggi.
- d. Memperbaiki ketangguhan pada tingkat kekuatan/kekerasan tertentu.
- e. Meningkatkan sifat tahan aus.
- f. Meningkatkan sifat tahan korosi.
- g. Memperbaiki sifat kemagnetan.

Pengaruh unsur paduan terhadap baja banyak dipengaruhi oleh cara penyebarannya di dalam konstituen baja itu sendiri. Pada dasarnya semua unsur paduan, sedikit atau banyak, dapat larut didalam fasa ferrite, dan austenite pada umumnya dapat melarutkan unsur paduan dalam jumlah yang lebih tinggi. Sebagian dari unsur-unsur paduan di dalam baja cenderung akan membentuk karbida, ada yang kecenderungannya tinggi ada pula yang rendah, bahkan ada yang tidak pernah dijumpai sebagai karbida. Unsur paduan yang memiliki kecenderungan kuat untuk larut dalam ferrite biasanya tidak membentuk karbida. Sebaliknya yang mempunyai kecenderungan kuat untuk membentuk karbida kelarutannya di dalam ferrite terbatas. Tabel 2.3 memperlihatkan pengelompokan unsur paduan menurut kecenderungannya untuk larut dalam ferrite atau membentuk karbida.

Tabel 2. 3 Perilaku unsur paduan dalam baja.

Unsur Paduan	Kelompok Larut dalam ferrite	Kelompok Membentuk Karbida
Nickel	Ni	
Silicon	Si	
Alumunium	Al	
Copper	Cu	
Mangan	Mn	Mn
Chromium	Cr	Cr
Tungsten	W	W
Molybdenum	Mo	Mo



Vanadium	V	—————▶	V
Titanium	Ti	—————▶	Ti

(E.C Bain. Alloying Element in Steels. 1961)

Unsur paduan selain mungkin dapat larut dalam ferrite dan austenite, dan membentuk karbida juga ada yang dapat membentuk nitride. Dan ternyata juga selain dapat membentuk suatu fasa, unsur paduan juga dapat menstabilkan suatu fasa (walaupun unsur tersebut tidak ikut membentuk fasa tersebut). Dari sini unsur paduan dapat dikelompokkan menurut fungsinya, membentuk suatu fasa atau menstabilkan suatu fasa tertentu. Berikut kelompok unsur paduan menurut fungsinya:

- a. Pembentuk atau penstabil ferrite, yaitu unsur paduan yang membuat ferrite menjadi lebih stabil sampai ke temperature yang lebih tinggi. Biasanya ferrite akan bertransformasi menjadi austenite pada suatu temperature tertentu, dengan adanya unsur paduan penstabil ferrite maka temperature transformasi ini akan naik, bahkan bila jumlah unsur itu cukup banyak ferrite tetap stabil sampai mulai terjadinya pencairan. Sebenarnya hampir semua unsur paduan memiliki sifat ini, kecuali Nickel dan Mangan. Yang terpenting pada kelompok ini adalah Cr, Si, Mo, W, dan Al.
- b. Pembentuk atau penstabil austenite, yaitu unsur paduan yang membuat austenite menjadi lebih stabil pada temperature yang lebih rendah. Biasanya austenite akan mulai bertransformasi bila didinginkan sampai ke temperature tertentu, dengan adanya unsur paduan ini temperature transformasi ini menjadi lebih rendah, bahkan dapat mencapai temperature kamar. Unsur yang terpenting pada kelompok ini adalah Ni dan Mn.
- c. Pembentuk karbida, yaitu unsur paduan yang di dalam baja dapat membentuk karbida. Yang terpenting dalam kelompok ini (diurut mulai dari yang mempunyai affinity terhadap karbon rendah) yaitu Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta dan Zr. Bila di dalam baja terdapat lebih dari satu unsur



pembentuk karbida belum tentu semuanya akan membentuk karbida, unsur yang mempunyai affinity lebih rendah mungkin tidak dapat membentuk karbida bila hampir semua karbon sudah terikat oleh unsur dengan affinity yang lebih tinggi. Karbida yang terbentuk ini dapat berupa karbida sederhana atau karbida kompleks. Adanya karbida akan menaikkan sifat tahan aus, biasanya *alloy steel* mengandung unsur pembentuk karbida yang cukup tinggi.

- d. Penstabil karbida, yaitu unsur paduan yang membuat karbida jadi lebih stabil, tidak mudah terurai dan larut ke dalam satu fasa. Unsur-unsur dalam kelompok ini (diurut dari yang lemah ke kuat) yaitu Co, Ni, W, Mo, Mn, Cr, V, Ti, Nb dan Ta. Disini tampak bahwa tidak selalu pembentuk karbida yang kuat adalah juga penstabil karbida yang kuat, misalnya Mn, ia adalah pembentuk karbida yang sangat lemah namun ia dapat berfungsi sebagai penstabil karbida yang cukup kuat, bahkan lebih kuat dari Mo.
- e. Pembentuk nitrida, yaitu unsur yang dapat membentuk nitrida. Pada dasarnya semua unsur pembentuk karbida adalah juga pembentuk nitrida (yang dapat membentuk nitrida bila dilakukan nitriding). Disamping itu aluminium juga merupakan pembentuk nitrida yang cukup kuat. Nitrida merupakan senyawa yang sangat keras, sehingga adanya senyawa ini dapat menaikkan kekerasan baja.

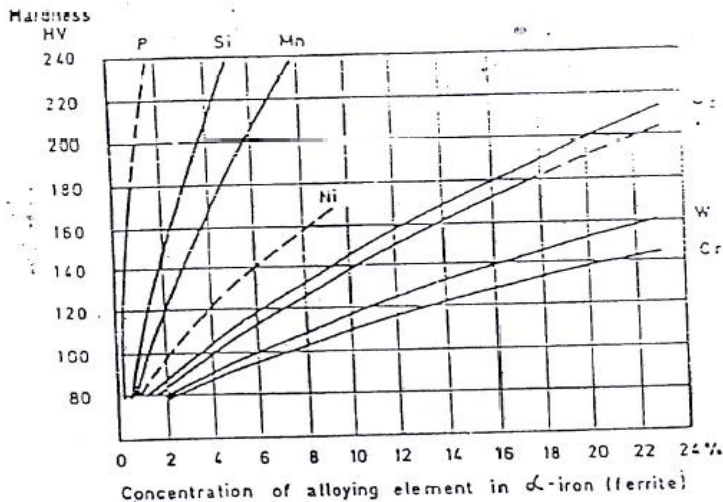
Adapun pengaruh unsur paduan dapat ditinjau dari beberapa keadaan, yaitu:

II. 4.1 Pengaruh Terhadap Ferrite

Semua unsur paduan yang membentuk larutan padat akan menaikkan kekerasan dan kekuatan. Demikian pula halnya dengan unsur paduan yang larut ke dalam ferrite, akan menaikkan kekerasan dan kekuatan ferrite. Pengaruh dari masing-masing unsur tidak sama, hal ini digambarkan pada grafik gambar 2.5. Dari grafik itu ternyata Si dan Mn, unsur paduan yang selalu



dijumpai di dalam baja, mempunyai pengaruh yang paling besar, sedangkan Cr memiliki pengaruh yang paling kecil. Dengan demikian bila baja diinginkan mempunyai hardenability tinggi dan akan di cold work sebelum dikeraskan, maka sebaiknya diberi unsur paduan Cr (Cr menaikkan hardenability tetapi hanya sedikit menaikkan kekerasan ferrite).



Gambar 2. 5 Pengaruh unsur paduan terhadap kekerasan ferrit.

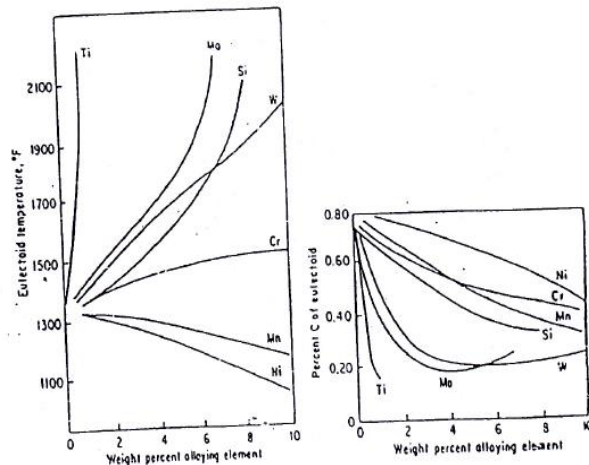
(Callister. 2009)

Namun demikian pengaruh unsur paduan terhadap kekuatan dan kekerasan baja secara keseluruhan hampir tidak berarti bila tidak terjadi perubahan struktur. Gambar 2.5 menunjukkan hal ini, pada struktur yang didinginkan lambat (furnace cooled) hampir tidak terjadi kenaikan kekuatan, tetapi pada struktur yang didinginkan lebih cepat (air cooled) terjadi kenaikan kekuatan yang cukup tinggi. Karena pengaruh unsur Chrom yang kecil inilah ia banyak digunakan sebagai unsur paduan pada baja yang akan banyak mengalami pengerjaan dingin.



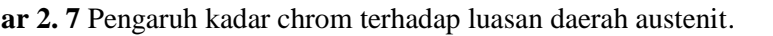
II. 4.2 Pengaruh Terhadap Diagram Fasa

Adanya unsur paduan di dalam baja akan merubah diagram fasa baja, pada umumnya titik eutektoid akan bergeser ke kiri sehingga kadar karbon di dalam perlit akan kurang dari 0.8% (Gambar 2.6). Unsur paduan yang berfungsi sebagai penstabil austenit, yaitu Ni dan Mn, menurunkan temperatur eutektoid ke kiri bawah, sedangkan unsur penstabil ferrit, akan menaikkan temperature eutektoid ke kiri atas. Selain itu unsur paduan penstabil ferrit akan memperluas daerah ferrit dan memperkecil daerah austenit, ini digambarkan dengan makin sempitnya daerah austenit dari baja dengan kadar Chrom yang tinggi (Gambar 2.7)

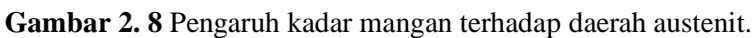


Gambar 2. 6 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid (kiri) dan kadar karbon dalam eutektoid (kanan).

(Callister. 2009)



generally



32



Unsur paduan penstabil austenit akan memperluas daerah austenit, digambarkan dengan makin luasnya daerah austenit dari baja dengan kadar Mangan yang makin besar (Gambar 2.8). Hal ini ternyata harus diperhitungkan dalam melakukan laku panas terhadap baja paduan, apakah baja itu dapat dikeraskan dengan laku panas, apakah temperature pemanasan harus lebih tinggi atau lebih rendah dan sebagainya.

II.4.3 Pengaruh Terhadap Diagram Transformasi

Juga terhadap diagram transformasi unsur paduan ikut berpengaruh. Semua unsur paduan kecuali Cobalt, akan menghambat pembentukan ferrit dan sementit pada pendinginan, jadi akan menggeser kurva transformasi ke kanan, kecuali Cobalt, menurunkan temperatur pembentukan martensit M_s juga M_f nya. Ini semua menyebabkan martensit lebih mudah terbentuk, jadi dapat dikatakan bahwa unsur paduan akan menaikkan hardenability baja.

Hanya saja perlu diingat bahwa dengan makin rendahnya M_s dan M_f seringkali menyebabkan timbulnya banyak austenit sisa, karena mungkin M_f sudah demikian sudah sedemikian rendahnya, lebih rendah dari temperatur kamar, sehingga pada temperatur kamar masih banyak terdapat austenit, sehingga kekerasan tidak mencapai yang diharapkan.

Temperatur M_s untuk baja paduan dapat dihitung dengan:

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (2. 21)$$

Untuk medium dan high alloy steel, Stuhlmann menganjurkan memakai persamaan:

$$M_s(^{\circ}C) = 550 - 350C - 40Mn - 20Cr - 10Mo - 17Ni - 8W - 35V - 10Cu + 15Co + 30 Al \quad (2. 22)$$

Sementara temperature M_f kira-kira $163-246^{\circ}C$ dibawah M_s .



II. 4.4 Pengaruh Terhadap Ukuran Butir

Beberapa unsur paduan dapat membentuk karbida atau nitrida berupa partikel halus yang terdispersi secara merata. Adanya partikel halus ini akan mencegah terjadinya pertumbuhan butir. Dalam banyak hal ini akan memberi pengaruh baik terhadap sifat mekanik berupa kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Unsur paduan yang mencegah terjadinya pertumbuhan butir ini antara lain: Vanadium, Titanium, Niobium, dan juga Aluminium. Ini banyak digunakan untuk membuat fine-grained steel untuk case hardening.

Untuk melarutkan karbida atau nitrida tersebut diperlukan temperatur yang lebih tinggi dan atau waktu tahan (holding time) yang lebih lama. Dalam melakukan pengerasan sering kali diharapkan untuk melarutkan seluruh karbon ke dalam austenit, agar nanti dapat diperoleh kekerasan yang lebih tinggi. Bila sebagian karbon yang ada dalam baja berupa karbida dari unsur diatas, maka pada temperatur pemanasan yang biasa karbida itu masih tetap belum larut ke dalam austenit, sehingga ini semua (butir kristal austenit yang halus dan kadar karbon atau paduan dalam austenit rendah) mengakibatkan turunnya hardenability. Untuk melarutkan semua karbida diperlukan temperatur yang lebih tinggi, tetapi bila temperatur dinaikkan lebih tinggi lagi sehingga semua karbon akhirnya larut, akan ada resiko terjadinya pertumbuhan butir yang sangat hebat. Ini juga dapat berakibat kurang baik.

Karbida kompleks juga sangat sukar dilarutkan saat pemanasan. Karena itu unsur-unsur paduan ini, yang menghambat pertumbuhan butir dan atau yang membentuk karbida kompleks, baru akan menaikkan hardenability bila pada pemanasan dapat larut dalam austenit. Tetapi mengingat ini menyangkut temperatur pemanasan yang terlalu tinggi dengan resiko terjadi pertumbuhan butir yang berlebihan maka harus dilakukan dengan lebih berhati-hati.

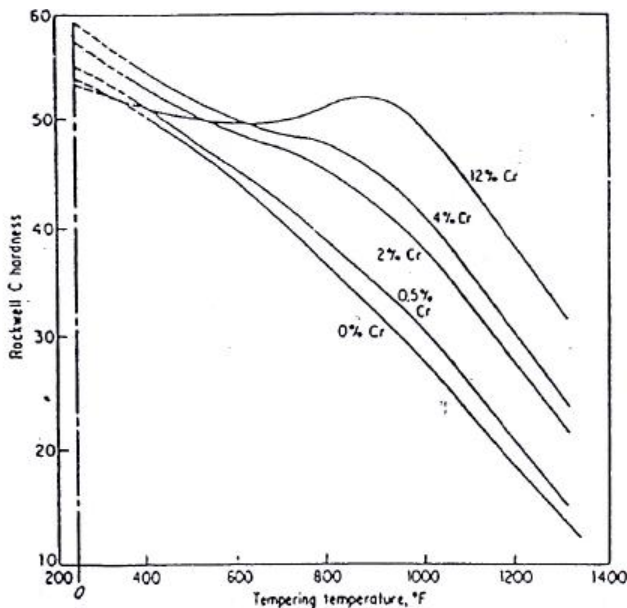
II.4.5 Pengaruh terhadap tempering

Baja yang dikeraskan akan melunak bila dipanaskan kembali (tempering). Makin tinggi temperatur tempering makin



banyak penurunan kekerasan yang terjadi. Semua unsur paduan menghambat laju penurunan kekerasan karena tempering. Unsur-unsur yang mudah larut dalam ferrit, unsur yang tidak membentuk karbida, seperti Ni, Si dan juga Mn pengaruhnya kecil sekali.

Unsur pembentuk karbida mempunyai pengaruh yang lebih kuat, apalagi unsur pembentuk karbida kompleks, seperti Cr, W, Mo, V dan lain-lain, pengaruhnya kuat sekali. Bukan saja akan menghambat penurunan kekerasan, bahkan bila terdapat dalam jumlah besar dapat menaikkan kekerasan pada tempering pada temperatur tinggi, dikenal sebagai secondary hardness (Gambar 2.9).



Gambar 2. 9 Pengaruh kadar chrom terhadap penurunan kekerasan setelah tempering.

(Avner. 1974)

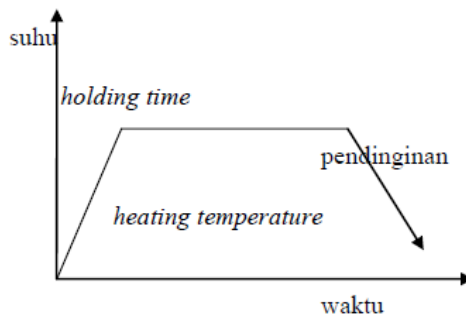


II. 5 Perlakuan Panas Pada Proses Manufaktur Baut

Perlakuan panas atau *heat-treatment* dapat di definisikan sebagai suatu kombinasi proses pemanasan dan pendinginan logam/ paduannya dalam keadaan padat secara terkontrol. Perlakuan panas atau *heat treatment* juga dapat didefinisikan sebagai sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduannya dalam keadaan padat dalam waktu tertentu. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh sifat yang diinginkan dengan merubah struktur mikronya (Wibowo, 2006). Tujuannya adalah mempersiapkan material logam sebagai produk setengah jadi agar layak diproses lanjut untuk meningkatkan umur pakai material logam sebagai produk jadi. Pertimbangan lain, dengan biaya perlakuan panas yang relatif rendah, umur pemakaiann komponen akan lebih lama. Secara umum, proses perlakuan panas adalah sebagai berikut:

- Memanaskan logam/paduannya sampai temperatur tertentu dengan kecepatan tertentu, (*Heating-temperatur*).
- Mempertahankan pada temperatur pemanasan tesebut dalam waktu tertentu, (*Holding time*).
- Mendinginkan dengan media pendingin dan laju tertentu.

Proses ini dapat pula di tunjukan melalui diagram temperatur vs waktu seperti seperti gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Proses perlakuan panas secara umum.

(Wibowo, 2006)



Ketiga kondisi proses diatas tergantung dari sifat yang ingin dicapai. Selama pemanasan dan pendinginan diharapkan didalam logam terjadi perubahan struktur mikro yang pada akhirnya akan diperoleh sifat baru yang kita inginkan. Perlu kita ketahui bahwa struktur mikro yang terjadi pada akhir proses perlakuan panas dipengaruhi oleh:

- Komposisi unsur dalam material dan hardenability.
- Proses perlakuan panas yang dilakukan pada bahan.
- Struktur/ kondisi awal material.

Dalam prakteknya terdapat banyak macam proses perlakuan panas yang dilakukan terhadap berbagai jenis logam/paduannya. Secara garis besar macam proses perlakuan panas dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu:

- Perlakuan panas yang menghasilkan struktur mikro yang ekuilibrium seperti: annealing, normalizing dan tempering.
- Perlakuan panas yang menghasilkan struktur yang non ekuilibrium seperti Hardening.

Untuk dapat mempelajari lebih mendalam proses perlakuan panas perlu memahami hal yang menyangkut perubahan struktur mikro logam selama terjadi perlakuan terhadap logam tersebut terutama:

- Ekuilibrium (keseimbangan) yang berkaitan dengan difusi.
- Transformasi fasa (selama pemanasan dan pendinginan).
- Perpindahan panas dan reaksi kimia.

(Ahmad Multazam, 2017)

Disamping itu semua dasar – dasar proses perlakuan panas melibatkan transformasi dan dekomposisi austenite. Langkah pertama dalam proses perlakuan panas pada baja adalah melakukan pemanasan sampai temperatur tertentu atau diatas temperatur kritis untuk membentuk fase *austenite*. Kemudian dilakukan penahanan waktu agar *austenite* dapat lebih homogen baru setelah itu baru dilakukan pendinginan. Proses pendinginan

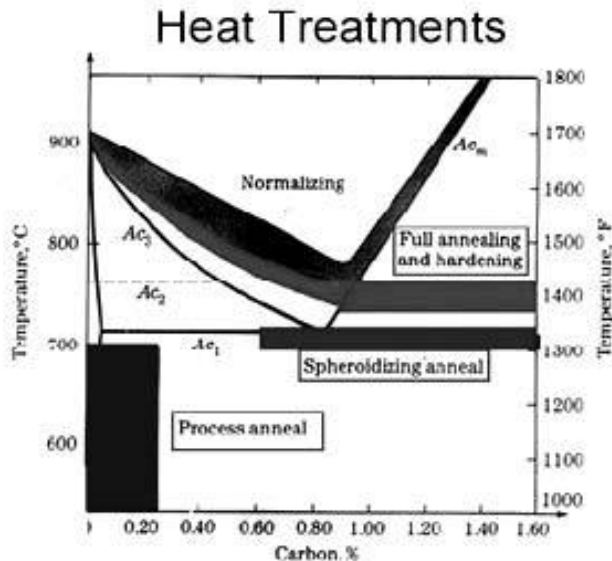


dilakukan dengan cermat agar benda kerja tidak mengalami cacat retak setelah dilakukan proses ini (Kuswanto, 2010).

II. 5.1 Austenisasi

Untuk memperoleh martensite yang keras, maka saat pemanasan haruslah dicapai struktur austenit, karena austenit inilah yang dapat bertransformasi menjadi martensit. Bila saat pemanasan masih terdapat struktur lain, maka setelah diquench struktur tidak seluruhnya menjadi martensit. Tetapi walaupun telah dicapai struktur austenit seluruhnya saat pemanasan, belum tentu kekerasan maksimum dapat dicapai karena mungkin didalam austenite terlalu banyak karbon yang akan menyebabkan terdapatnya austenit sisa setelah diquench. Untuk menentukan temperatur austenisasi material produk yang baru dihasilkan perlu dilakukan penelitian hingga diperoleh temperatur pemanasan dan *quench* yang dapat memberikan kekerasan yang maksimal. Sedangkan untuk produk yang telah distandard dapat kita mengikuti petunjuk dari *textbook* atau buku petunjuk yang diterbitkan oleh Pabrik.

Secara umum untuk baja karbon, temperatur austenitisasi yaitu 30–50 °C diatas tempertur kritis A3 untuk baja hypoeutectoid dan 30–50 °C diatas tempertur kritis A1 seperti ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Diagram hubungan temperatur vs heat treatment pada baja karbon.

(Ahmad Multazam.2017)

II. 5.2 Hardening

Hardness adalah fungsi dari kandungan karbon dari baja. Hardening baja mengalami perubahan dalam struktur BCC pada temperatur ruang ke FCC dalam daerah austenit. Baja dipanaskan pada daerah austenit kemudian di-Quenching tiba-tiba sehingga martensite terbentuk dengan struktur sangat kuat dan brittle (rapuh). Quenching lambat menimbulkan Austenite and Pearlite terbentuk yang sebagian keras dan sebagian lunak. Cooling rate lambat membentuk Pearlite yang lunak (soft). Kekerasan adalah ukuran ketahanan terhadap deformasi plastis oleh indentasi. Kemampukerasan (Hardenability) adalah kemampuan bahan untuk dikeraskan (“mudah tidaknya” kekerasan dapat dicapai). Baja



bertransformasi cepat dari austenite membentuk ferit dan karbida dengan kemampu kekerasan rendah, martensit tidak terbentuk (karena transformasi temperatur tinggi). Baja bertransformasi lambat dari austenite membentuk ferit dan karbida yang kemampukerasannya besar.



Gambar 2. 12 Mikrostruktur.

(Nurun Nayiroh. 2013)

Hardening adalah perlakuan panas terhadap baja/besi dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami baja/besi. Perlakuan panas menuntut pemanasan benda kerja menuju temperatur pengerasan didaerah atau di atas daerah kritis dan pendinginan berikutnya secara cepat dengan kecepatan pendinginan kritis. Akibat penyejukan dingin dari daerah temperatur pengerasan ini dicapai suatu keadaan paksa bagi struktur besi yang membentuk kekerasan. Oleh karena itu maka



proses pengerasan ini di sebut juga pengerasan kejut atau pencelupan langsung kekerasan yang tercapai pada kecepatan pendinginan kritis (martensit) ini di iringi kerapuhan yang besar dan tegangan pengejut. Pada setiap operasi perlakuan panas, laju pemanasan merupakan faktor yang penting. Panas merambat dari luar ke dalam dengan kecepatan tertentu bila pemanasan terlalu cepat, bagian luar akan jauh lebih panas dari bagian dalam oleh karena itu kekerasan di bagian dalam benda akan lebih rendah dari pada di bagian luar, dan ada nilai batas tertentu. Namun, air garam atau air akan menurunkan temperatur permukaan dengan cepat, yang diikuti dengan penurunan temperatur di dalam benda tersebut sehingga di peroleh lapisan keras dengan ketebalan tertentu

Proses hardening ini berguna untuk memperbaiki kekerasan dari baja tanpa dengan mengubah komposisi kimia secara keseluruhan. Proses ini mencakup proses pemanasan sampai pada austenisasi dan diikuti oleh pendinginan dengan kecepatan tertentu untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan. Temperatur yang dipilih tergantung pada jenis baja yang diproses, dimana temperatur pemanasan 50-100 °C di atas garis A3 untuk baja hypoeutektoid. Sedangkan proses pendinginannya bermacam-macam tergantung pada kecepatan pendinginan dan media quenching yang dikehendaki. Untuk pendinginan yang cepat akan didapatkan sifat logam yang keras dan getas sedangkan untuk pendinginan yang lambat akan didapatkan sifat yang lunak dan ulet. Pada baja hypoeutektoid temperatur di atas garis Ac3, struktur baja akan seluruhnya berkomposisikan butir austenit, dan pada saat pendinginan cepat akan menghasilkan martensit. Quenching baja hypoeutektoid dari temperatur di atas temperatur optimum akan menyebabkan terjadinya overheating. Overheating dalam hardening akan menghasilkan butir martensit kasar yang mempunyai kerapuhan yang tinggi. Proses ini sangat dipengaruhi oleh parameter tertentu seperti:

- Temperatur pemanasan, yaitu temperatur austenisasi yang dikehendaki agar dicapai transformasi yang seragam pada material.



- Waktu pemanasan, yaitu lamanya waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur pemanasan tertentu (temperatur austenisasi).
- Waktu penahanan, yaitu lamanya waktu yang diperlukan agar didapatkan distribusi temperatur yang seragam pada benda kerja.

Waktu pemanasan ini merupakan fungsi dari dimensi dan daya hantar panas benda kerja. Lamanya waktu penahanan akan menimbulkan pertumbuhan butir yang dapat menurunkan kekuatan material. Martensit adalah mikro konstituen yang terbentuk tanpa melalui proses difusi. Konstituen ini terbentuk saat Austenit didinginkan secara sangat cepat, misalnya melalui proses quenching pada medium air. Transformasi berlangsung pada kecepatan sangat cepat, mendekati orde kecepatan suara, sehingga tidak memungkinkan terjadi proses difusi karbon. Transformasi martensite diklasifikasikan sebagai proses transformasi tanpa difusi yang tidak tergantung waktu (diffusionless time-independent transformation). Martensit yang terbentuk berbentuk seperti jarum yang bersifat sangat keras (hard) dan getas (brittle). Fasa martensit adalah fasa metastabil yang akan membentuk fasa yang lebih stabil apabila diberikan perlakuan panas. Martensit yang keras dan getas diduga terjadi karena proses transformasi secara mekanik (geser) akibat adanya atom karbon yang terperangkap pada struktur kristal pada saat terjadi transformasi polymorfi dari FCC ke BCC. Hal ini dapat dipahami dengan membandingkan batas kelarutan atom karbon di dalam FCC dan BCC serta ruang intertisi maksimum pada kedua struktur kristal tersebut. Akibatnya terjadi distorsi kisi kristal BCC menjadi BCT atau (body centered tetragonal). Distorsi kisi akibat transformasi pada proses pendinginan secara cepat tersebut berbanding lurus dengan jumlah atom karbon terlarut. (Agus Pramono.2011)

II. 5.3 Quenching

Pengertian pengerasan ialah perlakuan panas terhadap baja dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami baja. Perlakuan panas menuntut pemanasan benda kerja menuju



temperatur pengerasan dan pendinginan secara cepat dengan kecepatan pendinginan kritis.

Pengerasan biasanya dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi. Pengerasan dilakukan dengan melakukan pemanasan dari baja hingga temperatur austenitisasi lalu mendinginkannya dengan cepat. Dengan pendinginan yang cepat akan terbentuk fasa martensit dimana kristal yang bertransformasi dari FCC menjadi BCT.

Kekerasan maksimum yang dapat dicapai tergantung pada kadar karbon dalam baja. Kekerasan yang terjadi pada suatu benda akan tergantung pada temperatur pemanasan dan waktu tahan dimana hal ini berpengaruh pada struktur pada saat pemanasan proses perlakuan panas ini

Adapun untuk mendapatkan struktur martensit diperlukan media pendingin agar didapatkan laju pendinginan kritis dari baja. Ada sejumlah media yang bisa digunakan antara lain air, larutan garam, minyak, campuran air dan minyak serta garam cair.

(Avner. 1974)

Kekerasan maksimum pada baja karbon dapat dicapai dengan pemanasan sampai fasa austenit kemudian dicelup (quench) pada laju pendinginan di atas nilai kritisnya sehingga terbentuk martensit yang keras, akan tetapi proses quenching dapat menyebabkan terjadinya tegangan sisa karena beda temperatur antara bagian luar (permukaan) dan dalam dari benda kerja. Media celup yang dipakai dapat berupa air atau minyak.

Proses quenching atau pengerasan baja adalah suatu proses pemanasan logam atau paduan sehingga mencapai batas austenit yang homogen. Untuk mendapatkan kehomogenan ini maka austenit perlu waktu pemanasan yang cukup. Selanjutnya secara cepat baja tersebut dicelupkan ke dalam media pendingin, tergantung pada kecepatan pendingin yang kita inginkan untuk mencapai kekerasan baja. Quenching (pencelupan dari temperatur tinggi) dilakukan pada bahan agar larutan padat yang terbentuk pada solution treatment tetap ada pada temperatur rendah.



Untuk menghindari terjadinya presipitasi yang cukup besar selama proses pendinginan maka perlu dipenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Waktu yang diperlukan untuk memindahkan komponen dari tungku (furnace) ke media pendingin harus cukup singkat.
- Volume, kapasitas penyerapan panas dan laju aliran media pendingin dipilih sedemikian hingga tidak terjadi presipitasi selama pendinginan

(Nurun Nayiroh. 2013)

Jika suatu benda kerja diquench ke dalam medium quenching, lapisan cairan disekeliling benda kerja akan segera terpanasi sehingga mencapai titik didihnya dan berubah menjadi uap. Berikut adalah 3 tahap pendinginan:

1. Tahap A (Vapor – Blanket Stage)

Pada tahap ini benda kerja akan segera dikelilingi oleh lapisan uap yang terbentuk dari cairan pendingin yang menyentuh permukaan benda. Uap yang terbentuk menghalangi cairan pendingin menyentuh permukaan benda kerja. Sebelum terbentuk lapisan uap, permukaan benda kerja mengalami pendinginan yang sangat intensif. Dengan adanya lapisan uap, akan menurunkan laju pendinginan karena lapisan terbentuk dan akan berfungsi sebagai isolator.

Pendinginan dalam hal ini terjadi efek radiasi melalui lapisan uap lama-kelamaan akan hilang oleh cairan pendingin yang mengelilinginya. Kecepatan menghilangkan lapisan uap makin besar jika viskositas cairan makin rendah. Jika benda kerja didinginkan lebih lanjut, panas yang dikeluarkan oleh benda kerja tidak cukup untuk tetap menghasilkan lapisan uap, dengan demikian tahap B dimulai.

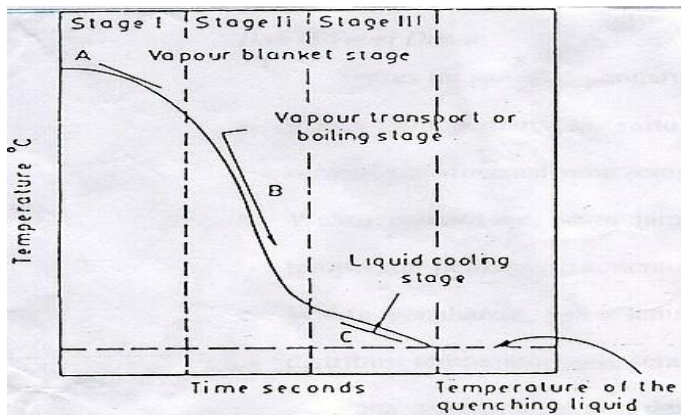
2. Tahap B (Vapor – Blanket Cooling Stage)

Pada tahap ini cairan pendingin dapat menyentuh permukaan benda kerja sehingga terbentuk gelembung – gelembung udara dan menyingkirkan lapisan uap sehingga laju pendinginan menjadi bertambah besar.



3. Tahap C (Liquid Cooling Stage)

Tahap C dimulai jika pendidihan cairan pendingin sudah berlalu sehingga cairan pendingin tersebut pada tahap ini sudah mulai bersentuhan dengan seluruh permukaan benda kerja. Pada tahap ini pula pendinginan berlangsung secara konveksi karena itu laju pendinginan menjadi rendah pada saat temperatur benda kerja turun. Untuk mencapai struktur martensit yang keras dari baja karbon dan baja paduan, harus diciptakan kondisi sedemikian sehingga kecepatan pendinginan yang terjadi melampaui kecepatan pendinginan kritis dari benda kerja yang diquench, sehingga transformasi ke perlit atau bainit dapat dicegah.



Gambar 2. 13 Diagram tahap pendinginan.

(Wahyudi. 2010)

- Media Pendingin

Untuk proses quenching kita melakukan pendinginan secara cepat dengan menggunakan media oli. Semakin cepat logam didinginkan maka akan semakin keras sifat logam itu. Karbon yang dihasilkan dari pendinginan cepat lebih banyak dari pendinginan lambat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar dan terjebak dalam struktur kristal dan membentuk



struktur tetagonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat.

Untuk mendinginkan bahan di kenal berbagai macam bahan dimana untuk memperoleh pendinginan yang merata maka bahan pendinginan tersebut hampir semuanya di sirkulasi, contohnya yaitu:

1. Air

Air memberi pendinginan yang sangat cepat.

2. Minyak / Oli

Minyak / oli memberi pendinginan yang cepat, oleh karena untuk keperluan ini minyak harus memenuhi berbagai macam persyaratan.

3. Udara

Udara memberi pendinginan yang perlahan-laha. Udara tersebut ada yang disirkulasi dan ada pula yang tidak disirkulasi.

- Holding Time (Waktu Tahan)

Holding time dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses quenching dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya homogen. Pada proses holding time sangat diperlukan untuk menghasilkan kelarutan karbon pada baja, semakin lama holding timenya maka semakin banyak karbon yang berdifusi dengan besi.

- Difusi

Difusi adalah peristiwa mengalirnya/berpindahnya suatu zat dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah.

Contoh yang sederhana adalah penambahan carbon ke dalam baja karbon rendah sehingga pada baja, karbonnya lebih besar. Difusi yang paling sering terjadi adalah difusi molekuler. Difusi ini terjadi jika terbentuk perpindahan dari sebuah lapisan (*layer*) molekul yang diam.

Apabila temperatur pada suatu material naik, akan menyebabkan atom- atomnya bergetar dengan energi yang lebih



besar dan sejumlah kecil atom akan berpindah dalam kisi. Mekanisme perpindahan atom dalam suatu logam dapat terjadi secara interstisi dan kekosongan. Perpindahan secara interstisi terjadi bila atom tidak memiliki ukuran yang sama. Sedangkan perpindahan secara kekosongan dapat terjadi bila semua atom memiliki ukuran sama. Proses difusi dapat terjadi lebih cepat apabila:

- a. Temperatur tinggi
- b. Atom yang berdifusi kecil
- c. Ikatan struktur induk lemah (dengan titik cair rendah.
- d. Terdapat cacat-cacat dalam bahan (kekosongan atau batas butir)

(Arif Andrianto, 2011)

II. 5.4 Tempering

Tempering didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan (*quenching*) pada temperatur tempering (di bawah temperatur kritis) sehingga diperoleh *ductility* tertentu, yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Prosesnya adalah memanaskan kembali berkisar antara temperatur 150°C – 650°C dan didinginkan secara perlahan-lahan tergantung sifat akhir baja tersebut (Callister, 2007).

Adalah suatu proses perlakuan panas yang mereduksi kegetasan dari bahan. Proses ini dilakukan pada temperatur di bawah kira-kira 723°C untuk mengurangi kekerasan bahan dan menambah keuletan bahan. Dengan temper mikrostruktur baja akan homogen dan tegangan sisa akibat pemanasan yang tinggi selama di *quenching* tereliminasi atau dapat diminimalisasi. Baja yang dikeraskan seharusnya ditemper sebelum digunakan.

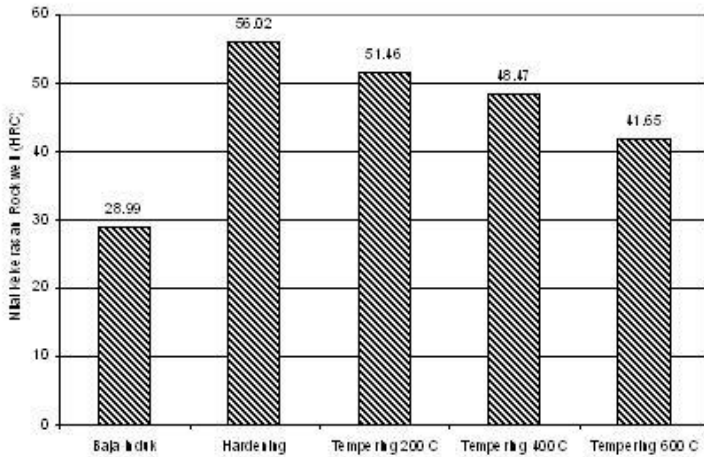
Dalam hasil riset, Sigit Gunawan (2005) menyatakan korelasi antara pengaruh temperatur tempering terhadap ketangguhan impak dan kekuatan tarik baja AISI 420 dimana ketangguhan impak cenderung naik seiring dengan naiknya temperatur temper, sebaliknya kekuatan tarik cenderung menurun dengan kenaikan temperatur temper. Sejalan dengan penelitian



oleh Hasta Kuntara (2005) dengan baja X165CrMoV12 untuk bahan cetakan. Kemudian oleh V.N. Potluri (2002) menyatakan pengaruh waktu tempering terhadap sifat mekanis bahan berupa kekerasan dan kekuatan dimana kekerasan turun dengan kenaikan waktu temper, tetapi kekuatan tarik tidak terlalu berpengaruh terhadap waktu temper. Kemudian Bakri & Chandrabakty (2006) menyatakan kekuatan tarik dan ketangguhan baja komersial tidak terlalu berpengaruh secara signifikan terhadap variasi waktu (1 jam, 2 jam, 3 jam dan 4 jam) perlakuan panas temper (600°C) (Nurun Nayiroh. 2013).

Tempering adalah memanaskan kembali baja yang telah dikeraskan untuk menghilangkan tegangan dalam dan mengurangi kekerasan. Proses pemanasan berkisar pada temperatur 150 – 650⁰ C dan diinginkan secara perlahan-lahan tergantung sifat akhir yang diinginkan. Berdasarkan tujuan yang diinginkan, tempering dibagi menjadi tiga daerah temperatur pemanasan yaitu:

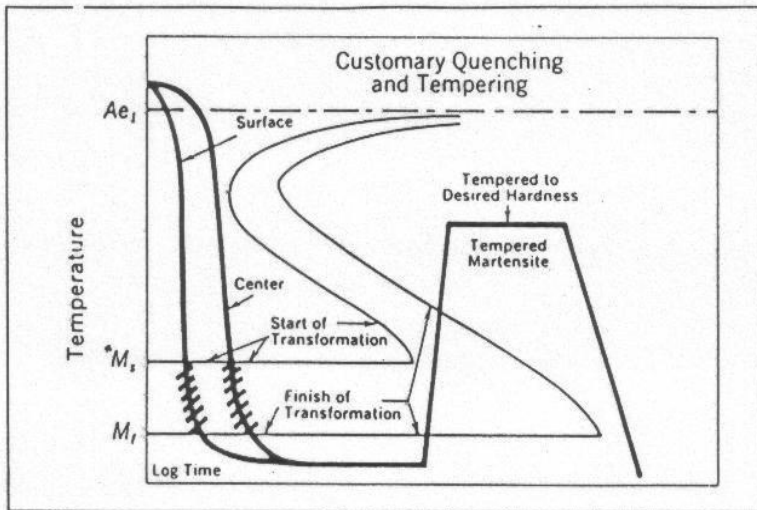
- Tempering pada temperatur rendah (150 – 300) °C.
Tujuannya: Hanya untuk mengurangi tegangan-tegangan kerut dan kerapuhan. Tepering pada temperatur ini digunakan untuk bahan yang tak mengalami beban yang berat seperti alat potong dan mata bor yang dipakai untuk kaca dan lain-lain.
- Tempering pada Temperatur Menengah (300 –500) °C.
Tujuan: Meningkatkan keuletan dan kekerasannya sedikit berkurang. Tepering pada temperatur ini dilakukan pada alat-alat kerja yang mengalami beban yang berat.
- Tempering pada Temperatur tinggi (500 – 650) °C.
Tujuan: Untuk memberikan daya keuletan yang besar dan sekaligus mengurangi kekerasan. Proses ini digunakan pada roda gigi, poros, batang penggerak dan lain-lain. Sebagai contoh diperlihatkan pada gambar 2.14 dibawah ini merupakan hasil tempering AISI 4130.



Gambar 2. 14 Contoh hasil tempering pada baja AISI 4130 (penurunan kekerasan akibat tempering).

(Ahmad Multazam. 2017)

Proses tempering dilakukan dengan cara memanaskan baja yang telah dicelup (struktur martensit) di bawah temperatur eutectoid sehingga menjadi lunak dan ulet. Proses quenching-tempering seperti pada gambar 2.15 di bawah.



Gambar 2. 15 Proses quenching-tempering untuk baja karbon.

(Ahmad Multazam. 2017)

Temperatur tempering sangat mempengaruhi struktur mikro dan kekerasan baja karbon. Selama proses tempering terjadi reaksi-reaksi berikut:

- Segregasi Karbon

Proses tempering pada temperatur 25-100 °C menyebabkan redistribusi C ke posisi atau tempat dengan energi rendah yaitu ruang antar atom (lattice site) dekat dislokasi.

- Endapan Karbida (Carbide Precipitation)

Pemanasan martensit pada temperatur 100-200 °C menyebabkan terjadinya endapanan carbide atau ($Fe_{2-3}C$, HCP) sedangkan pada temperatur antara 200-300 °C menghasilkan Hagg carbide (Fe_5C_2 , monoclin). Pada interval temperatur 250-700 °C akan terbentuk cementite (Fe_3C , orthorhombic). Cementite ini tumbuh pada batas



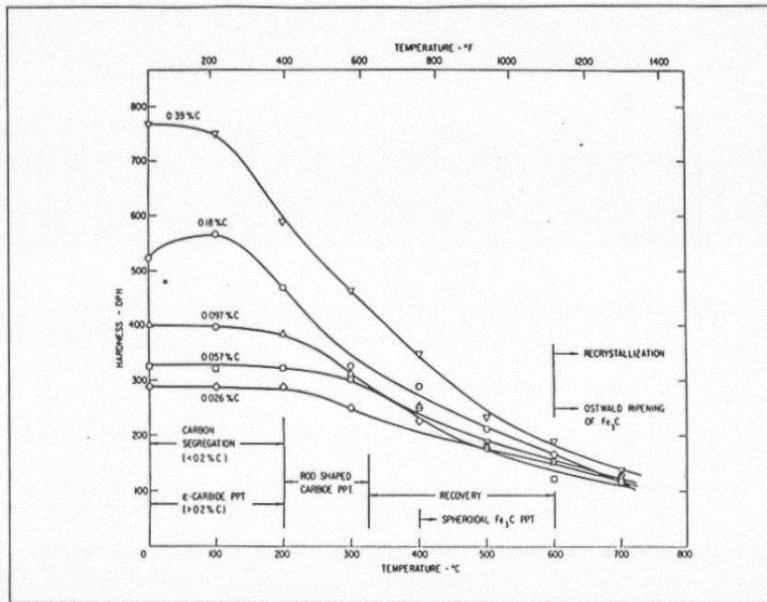
bilah-bilah martensit dan pada batas butir ferit. Pada temperatur antara 400-600 °C, karbida dalam bentuk bilah bergabung dan membentuk spheroidite.

- Penguraian Austenit Sisa

Austenit sisa hanya terdapat pada baja karbon dengan %C lebih besar dari 0,4 % sehingga banyak terdapat pada baja karbon sedang dan tinggi.

- Recovery dan Rekristalisasi

Recovery terjadi pada temperatur 400 °C dan selama recovery, dislokasi akan mengalami perubahan susunan dengan energi rendah dan menghasilkan butir halus. Rekristalisasi terjadi pada temperatur 600 °C dan menghasilkan struktur ferit dengan bentuk poligonal (equiaxed). Temperatur temper pada Fe-C tidak banyak mempengaruhi kekerasan jika temperturnya 200 °C akan tetapi di atas temperatur ini kekerasan turun secara gradual.



Gambar 2. 16 Diagram kekerasan martensit (0,026-0,39 %C) yang ditemper pada temperatur 100-700 °C selama 1 Jam.

(Wahyudi. 2010)

- Pengaruh Ukuran Butir

Ukuran butir biasanya dinyatakan menurut *ASTM grain size number* atau indeks ASTM dan dinyatakan dengan persamaan:

$$n = 2^{n-1} \quad (2. 23)$$

dengan n jumlah butir tiap ini pada perbesaran 100X. Pada baja karbon rendah dengan struktur mikro ferit, ukuran butir sangat berpengaruh terhadap tegangan luluh dimana semakin kecil ukuran butir kekuatan tarik akan meningkat. Hal ini disebabkan karena butir keel berarti mempunyai batas butir yang banyak dan batas butir ini menghambat gerakan dislokasi. Hubungan antara



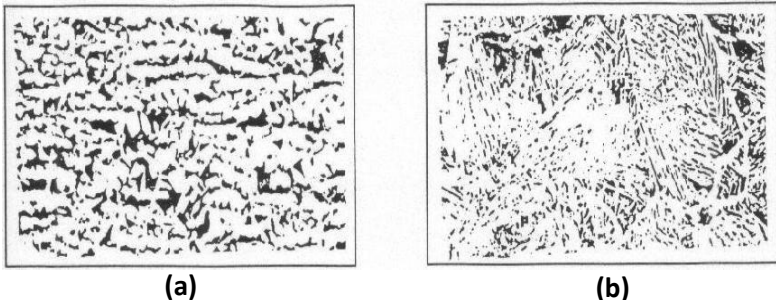
tegangan luluh dan ukuran butir dinyatakan oleh persamaan HallPetch, yaitu:

$$\sigma_y = \sigma_1 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.24)$$

Dengan σ_y adalah tegangan luluh, tegangan friksi, k konstanta dan d diameter butir.

- Pengaruh Ukuran Butir Austenit

Jika baja hypoeutectoid dengan ukuran butir kecil didinginkan secara lambat (pendinginan udara) dari fasa austenit maka akan terbentuk proeutectoid ferrite pada batas butir austenit dan terjadi pembuangan C ke pusat butir melalui difusi dan sisa austenit berubah menjadi perlit sampai temperatur kamar.



Gambar 2. 17 (a) Proeutectoid ferrite tumbuh pada butir austenit kecil dan (b) Ferit.

(Wahyudi. 2010)

Widmanstatten dihasilkan dari butir austenit besar. Jika butir austenit cukup besar dibanding ukuran proeutectoid ferrite maka pada proeutectoid ferrite akan tumbuh ferit Widmanstatten menuju ke dalam butir sebagai akibat dari kondisi butir austenit yang jenuh dengan C.

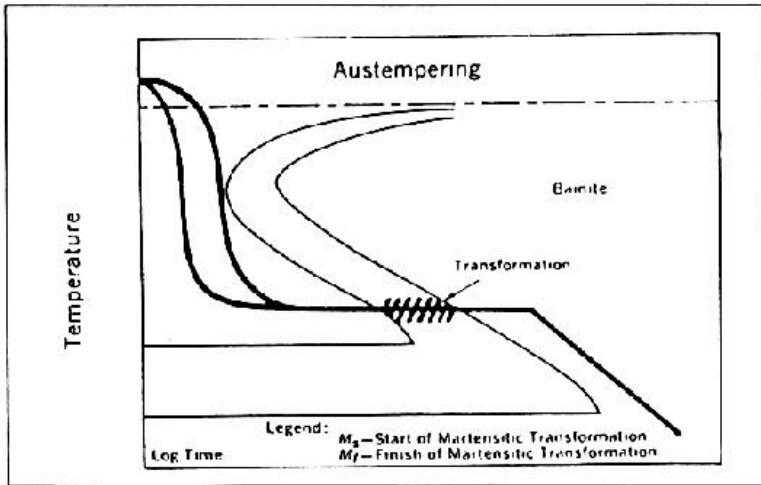
Austempering Dan Martempering

- Austempering

Austempering adalah proses perlakuan panas isothermal yang menghasilkan struktur mikro berupa bainit. Austempering dilakukan dengan cara memanaskan baja sampai terbentuk austenit kemudian dicelup ke dalam garam cair (*salt bath*) pada



temperatur di atas temperatur terbentuknya martensit (M_s), ditahan beberapa lama kemudian didinginkan di udara.

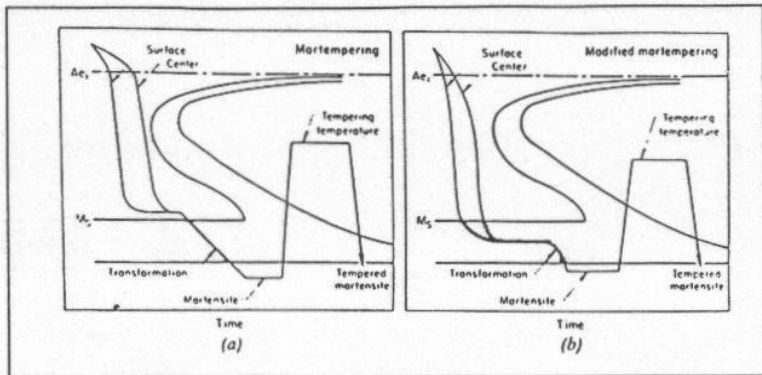


Gambar 2. 18 Proses Austemper pada Baja Karbon Eutektoid.
(Wahyudi. 2010)

Austempering biasanya digunakan sebagai pengganti perlakuan quenching-tempering untuk:

1. Meningkatkan keuletan dan ketangguhan
 2. Menghindari terjadinya retak dan distorsi karena quenching
- Martempering (Marquenching)

Martempering merupakan modifikasi dari perlakuan quenching dan bertujuan untuk mengurangi terjadinya distorsi.



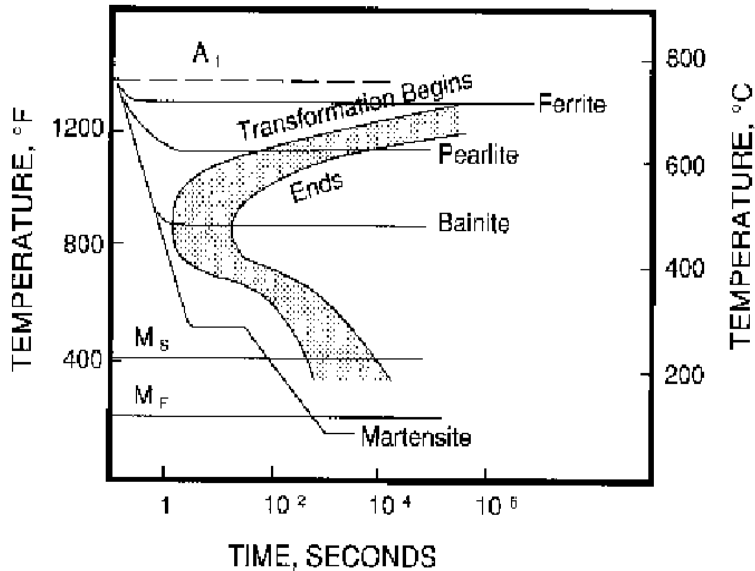
Gambar 2. 19 (a) Proses martempering dan (b) modifikasinya.

(Wahyudi. 2010)

Perlakuan martempering terdiri dari: (1) pemanasan sampai fasa austenit diikuti dengan (2) pencelupan ke dalam minyak panas atau garam cair sedikit di atas atau di bawah temperatur M_s dan (3) ditahan pada temperatur konstan beberapa lama tetapi belum sampai terjadi reaksi bainit dan akhirnya (4) pendinginan udara pada laju yang sedang untuk mengurangi beda temperatur di bagian permukaan dan tengah benda uji.

II. 6 Diagram TTT dan CCT

Untuk menentukan laju reaksi perubahan fasa yang terjadi dapat diperoleh dari diagram TTT (*Time Temperature Transformation*). Diagram TTT untuk baja.



Gambar 2. 20 Diagram TTT.

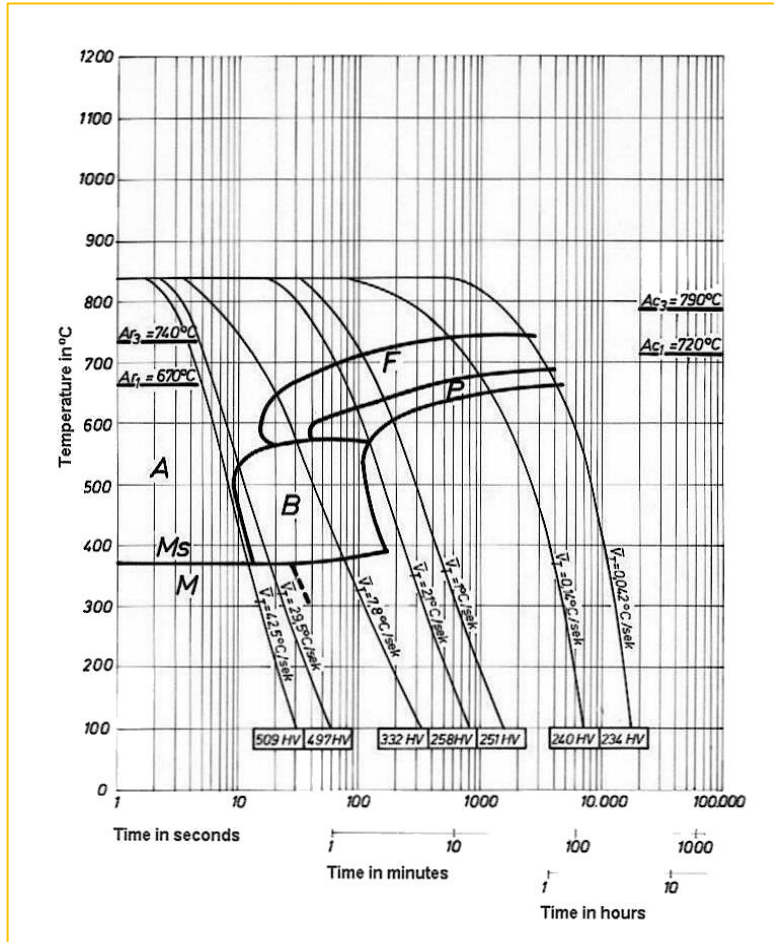
(Wahyudi. 2010)

Dari gambar 2.20 diatas menunjukkan bentuk hidung (*nose*) sebagai batasan waktu minimum dimana sebelum waktu tersebut bertransformasi austenit ke perlit tidak akan terjadi. Posisi hidung dari diagram TTT dapat bergeser menurut kadar karbon. Posisi hidung bergeser makin kekanan yang berarti baja karbon itu makin mudah untuk membentuk bainit/martensit atau makin mudah untuk dikeraskan. Sedangkan M_s merupakan temperatur awal mulai terbentuknya fasa martensit dan M_f merupakan temperatur akhir dimana martensit masih bisa terbentuk.

Untuk mendapatkan hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro (fasa) yang terbentuk biasanya dilakukan dengan menggabungkan diagram kecepatan



pendinginan kedalam diagram TTT yang dikenal dengan diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*).



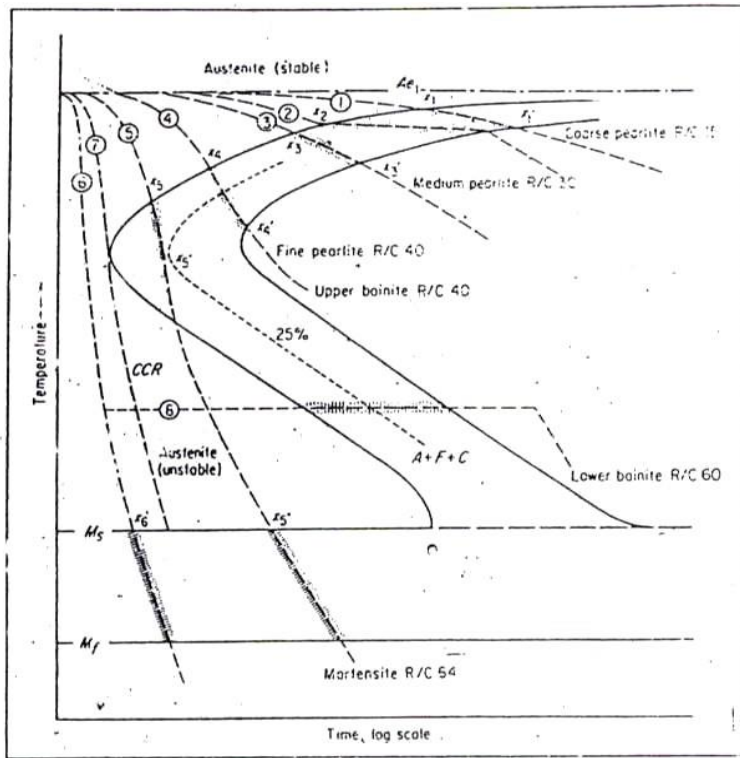
Gambar 2. 21 Diagram CCT AISI 1045 (Continuous Cooling Transformation)

(Sumber: <http://sij.metalravne.com>)

Pada contoh gambar 2.21 diatas menjelaskan bahwa bila



kecepatan pendinginan naik berarti bahwa waktu pendinginan dari temperatur austenit turun, struktur akhir yang terjadi berubah dari campuran ferit–perlit ke campuran ferit–perlit–bainit–martensit, ferit–bainit–martensit, kemudian bainit– martensit dan akhirnya pada kecepatan yang tinggi sekali struktur yang terjadi adalah martensit.



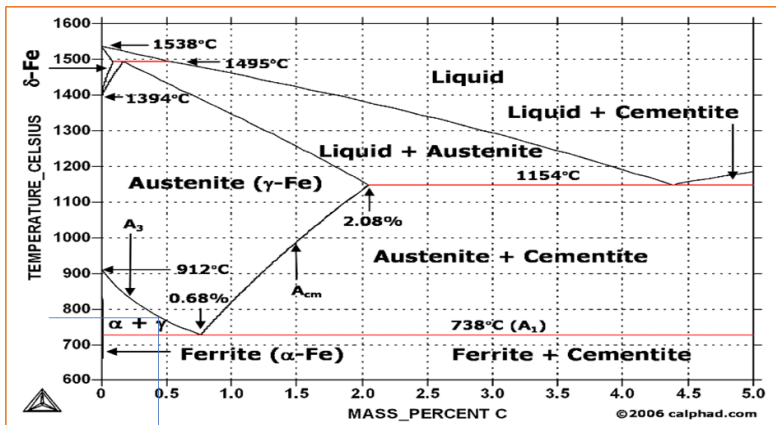
Gambar 2. 22 Kurva Pendinginan pada Diagram TTT.

(Wahyudi. 2010)



Dari gambar 2.22 kurva pendinginan diatas dapat dilihat bahwa dengan pendinginan cepat (kurva 6) akan menghasilkan struktur austenit karena garis pendinginan lebih cepat dari pada kurva 7 yang merupakan laju pendinginan kritis (*critical cooling rate*) yang nantinya akan tetap terbentuk fase austenite (*unstable*). Sedangkan pada kurva 6 lebih cepat dari pada kurva 7, sehingga terbentuk struktur martensite yang keras, tetapi bersifat rapuh karena tegangan dalam yang besar.

II. 7 Diagram Fasa



Gambar 2. 23 Diagram Fasa AISI 1045.

(Sumber: <http://www.calphad.com>)

Telah diketahui bahwa banyak macam ataupun struktur yang mungkin terjadi pada satu paduan. Karena sifat suatu bahan banyak tergantung pada jenis, jumlah banyaknya dan bentuk dari fasa yang terjadi maka sifat akan berubah hal – hal diatas berubah. Karna itu perlu diketahui dari suatu paduan pada kondisi bagai mana suatu fasa dapat terjadi dan pada kondisi bagaimana suatu fasa dapat terjadi dan pada kondisi yang bagaimana fasa dapat berubah.



Sejumlah data mengenai perubahan fasa dari berbagai sistem paduan telah dikumpulkan dan dicatat dalam bentuk diagram atau yang dikenal dengan diagram fasa, juga disebut dengan diagram keseimbangan atau diagram equilibrium.

Diagram fasa merupakan diagram untuk perlakuan panas bagi logam, dan diagram fasa besi – karbon diberlakukan untuk baja. Memahami diagram fasa menjadi sebuah tuntutan karena terdapatnya hubungan struktur mikro dengan sifat – sifat mekanis suatu material, yang semuanya berhubungan dengan karakteristik diagram fasanya. Diagram fasa juga memberikan informasi penting tentang titik leleh, titik kristalisasi, dan fenomena lainnya.

Dari diagram fasa yang ditunjukkan pada gambar 2.23 terlihat bahwa temperatur sekitar 723°C merupakan temperatur transformasi austenit menjadi fasa perlit (yang merupakan gabungan fasa ferit dan sementit). Transformasi fasa ini dikenal sebagai reaksi eutectoid dan merupakan dasar proses perlakuan panas dari baja. Sedangkan daerah fasa yang prosentase larutan karbon hingga 2 % yang terjadi di temperatur 1.147°C merupakan daerah besi gamma (γ) atau disebut austenit. Pada kondisi ini biasanya austenit bersifat stabil, lunak, ulet, mudah dibentuk, tidak ferro magnetis dan memiliki struktur kristal Face Centered Cubic (FCC).

Besi murni pada temperatur dibawah 910°C mempunyai struktur kristal Body Centered Cubic (BCC). Besi BCC dapat melarutkan karbon dalam jumlah sangat rendah, yaitu sekitar 0,02 % maksimum pada temperatur 723°C . Larutan pada intensitas dari karbon didalam besi ini disebut juga besi alpha (α) atau fasa ferit. Pada temperatur diantara 910°C sampai 1.390°C , atom-atom besi menyusun diri menjadi bentuk kristal Face Centred Cubic (FCC) yang juga disebut besi gamma (γ) atau fasa austenit. Besi gamma ini dapat melarutkan karbon dalam jumlah besar yaitu sekitar 2,06 % maksimum pada temperatur sekitar 1.147°C . Penambahan karbon ke dalam besi FCC ditransformasikan kedalam struktur BCC dari 910°C menjadi 723°C pada kadar karbon sekitar 0,8 %.



Diantara temperatur 1.390°C dan temperatur cair 1.534°C , besi gamma berubah menjadi susunan BCC yang disebut besi delta (δ).

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan didalam diagram Fe – Fe₃C yaitu, perubahan fasa ferit atau besi alpha (α), austenit atau besi gamma (γ), sementit atau karbida besi, perlit dan sementit akan diuraikan dibawah ini:

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan didalam diagram Fe – Fe₃C yaitu, perubahan fasa ferit atau besi alpha (α), austenit atau besi gamma (γ), sementit atau karbida besi, perlit dan sementit akan diuraikan dibawah ini:

1 Ferrite atau besi alpha (α)

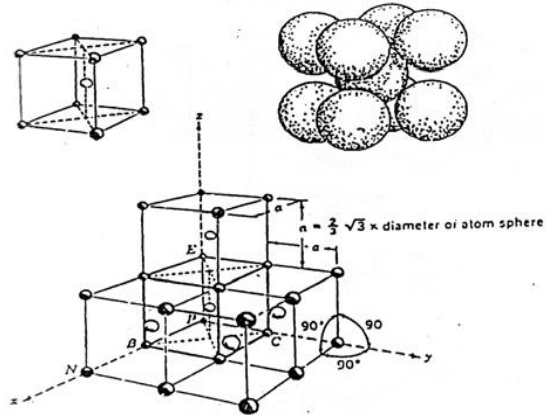
Merupakan modifikasi struktur besi murni pada temperatur ruang, dimana ferit menjadi lunak dan ulet karena ferit memiliki struktur BCC, maka ruang antara atom-atomnya adalah kecil dan padat sehingga atom karbon yang dapat tertampung hanya sedikit sekali.

2 Austenit atau besi gamma (γ)

Merupakan modifikasi dari besi murni dengan struktur FCC yang memiliki jarak atom lebih besar dibandingkan dengan ferit. Meski demikian rongga-rongga pada struktur FCC hampir tidak dapat menampung atom karbon dan penyisipan atom karbon akan mengakibatkan tegangan dalam struktur sehingga tidak semua rongga dapat terisi, dengan kata lain daya larutnya jadi terbatas.

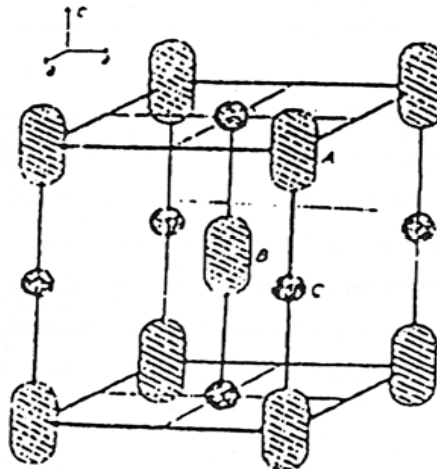
3 Karbida Besi atau Sementit

Adalah paduan Besi karbon, dimana pada kondisi ini karbon melebihi batas larutan sehingga membentuk fasa kedua atau karbida besi yang memiliki komposisi Fe₃C. Hal ini tidak berarti bila karbida besi membentuk molekul Fe₃C, akan tetapi kisi kristal yang membentuk atom besi dan karbon mempunyai perbandingan 3:1. Karbida pada ferit akan meningkatkan kekerasan pada baja sifat dasar sementit adalah sangat keras.



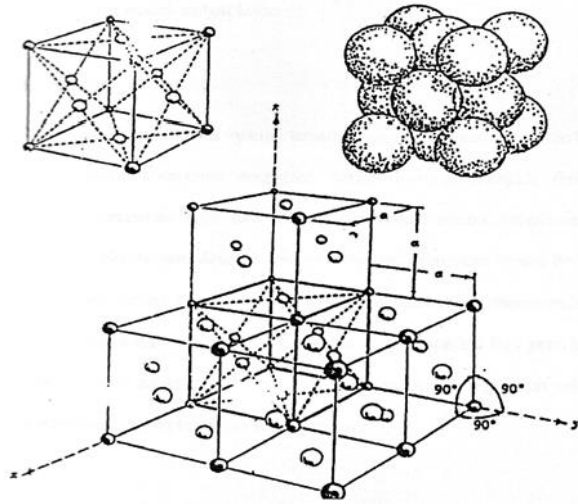
Gambar 2. 24 Struktur Kristal BCC.

(Wahyudi. 2010)



Gambar 2. 25 Struktur Kristal FCC.

(Wahyudi. 2010)



Gambar 2. 26 Struktur Kristal BCT.

(Wahyudi. 2010)

4 Perlit

Merupakan campuran khusus yang terjadi atas dua fasa yang terbentuk austenisasi, dengan komposisi eutektoid bertransformasi menjadi ferit dan karbida. Ini dikarenakan ferit dan karbida terbentuk secara bersamaan dan keluarnya saling bercampur. Apabila laju pendinginan dilakukan secara perlahan-lahan maka atom karbon dapat berdifusi lebih lama dan dapat menempuh jarak lebih jauh, sehingga di peroleh bentuk perlit besar. Dan apabila laju pendinginan lebih di percepat lagi maka difusi akan terbatas pada jarak yang dekat sehingga akhirnya menghasilkan lapisan tipis lebih banyak.

5 Martensit

Adalah suatu fasa yang terjadi karena pendinginan yang sangat cepat sekali, dan terjadi pada temperatur dibawah eutektoid tetapi masih diatas temperatur kamar. Karena struktur



austenit FCC tidak stabil maka akan berubah menjadi struktur BCT secara serentak. Pada reaksi ini tidak terjadi difusi tetapi terjadi pengerasan (dislokasi). Semua atom bergerak serentak dan perubahan ini langsung dengan sangat cepat dimana semua atom yang tinggal tetap berada pada larutan padat karena terperangkap dalam kisi sehingga sukar menjadi slip, maka martensit akan menjadi kuat dan keras tetapi sifat getas dan rapuh menjadi tinggi. Martensit dapat terjadi bila austenit didinginkan dengan cepat sekali (dicelup) hingga temperatur dibawah pembentuk bainit.

Martensit terbentuk karena transformasi tanpa difusi sehingga atom-atom karbon seluruhnya terperangkap dalam larutan super jenuh. Keadaan ini yang menimbulkan distorsi pada struktur kristal martensit dan membentuk BCT. Tingkat distorsi yang terjadi sangat tergantung pada kadar karbon. Karena itu martensit merupakan fasa yang sangat keras namun getas.

Martensit dihasilkan dari austenit yang bertransformasi. Pada temperature media pendingin yang sangat rendah austenite mengalami driving force untuk berubah dari FCC menjadi BCC yang menimbulkan shear force terhadap atomatom. Hal ini menyebabkan atom-atomnya sedikit bergeser untuk membentuk BCC, tetapi karena didalam austenite masih terdapat banyak karbon dan karbon tidak dapat berdifusi lagi akibat waktu pendinginan yang sangat cepat maka struktur BCC tidak dapat tercapai. Salah satu sel rusuk satuannya lebih panjang daripada yang lain. Sehingga membentuk struktur kristal baru menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*). (Abrianto, 2008)

Bila austenit pada baja *hipereutektoid* dipanaskan sampai temperatur *austenisasi* ($> 723^{\circ}\text{C}$) dan ditahan untuk beberapa lama kemudian dicelup dengan cepat (*rapid cooling*) ke dalam media pendingin (air atau oli) maka austenit akan berubah menjadi martensit yang sangat keras (Elvis Sumara. 2010).

II. 8 Tegangan Thermal

Tegangan termal diperoleh dari hasil perubahan temperature yang terjadi dalam suatu material pada selang waktu tertentu. Tegangan termal disebabkan oleh pendinginan cepat,



karena temperatur di luar material lebih cepat mengalami perubahan daripada didalam material (Callister, 2009).

II. 9 Metode Elemen Hingga

Teknik perhitungan iterasi, sudah dipelajari pada aljabar matriks atau persamaan linier simultan untuk menemukan solusi numerik dari beberapa persamaan linier simultan. Iterasi merupakan teknik perhitungan yang digunakan pada simulasi dan modelling berbasis komputer seperti untuk mengetahui distribusi temperatur pada pelat logam, mengetahui kekuatan rangka baja, desain gedung pencakar langit, pembangunan pabrik, pembangunan jembatan, pembakaran pada mesin bermotor, aerodinamika, kekuatan sayap pesawat terbang, aliran fluida dalam sambungan pipa dan masih banyak lagi. Hampir semua simulasi komputer pasti menggunakan teknik iterasi di dalam perhitungannya. Spesifik pada penelitian ini, adalah simulasi distribusi temperatur pada objek (geometri) baut menggunakan software Ansys modul workbench (Ansys-workbench) versi 18.1 2017.

Untuk kasus keteknikan seperti tersebut, terdapat banyak sekali parameter variabel dan persamaan yang sangat melelahkan dan membutuhkan waktu yang tidak sedikit untuk mencari solusi dari persamaan tadi apabila dilakukan dengan cara substitusi atau eliminasi. Karena keterbatasan teknik substitusi-eliminasi pada kasus-kasus yang melibatkan banyak variabel dan persamaan, munculah teknik perhitungan yang dinamakan teknik iterasi. Iterasi adalah proses perhitungan berulang untuk mendapatkan solusi dari persamaan-persamaan aljabar tertentu. Tujuan iterasi sebenarnya sama saja dengan teknik substitusi-eliminasi, namun metodenya berbeda. Keuntungan menggunakan teknik iterasi adalah bahwa teknik iterasi dapat dengan mudah diterapkan pada program komputer daripada teknik substitusi-eliminasi; teknik substitusi-eliminasi tidak memiliki urutan penyelesaian yang kaku, seseorang yang menghitung dengan menggunakan teknik substitusi-eliminasi mungkin saja menggunakan langkah-langkah penyelesaian yang berbeda dengan langkah-langkah yang



dilakukan oleh orang lain, maksudnya, seseorang mungkin melakukan substitusi di awal langkah perhitungannya di mana orang lain mungkin lebih senang melakukan eliminasi terlebih dahulu. Substitusi-eliminasi sulit diterapkan pada program komputer apalagi untuk menyelesaikan banyak persamaan-persamaan serta variabel. Oleh karena itu, iterasi dirancang untuk dapat diterapkan pada program komputer dan karena komputer adalah mesin hitung yang cepat dan tepat, iterasi menjadi pilihan utama dalam menyelesaikan kasus dengan banyak persamaan aljabar serta variabel yang ingin diketahui solusinya.

Hampir semua persamaan fisika yang mendasari simulasi dan modelling komputer adalah persamaan yang rumit dan hampir bisa dikatakan mustahil untuk dapat dipecahkan secara analitis. Namun sampai saat ini belum ada teknik kalkulus yang bisa memecahkan berbagai macam kasus yang melibatkan persamaan fisika yang rumit seperti pada kasus simulasi ini. Untuk itu, daripada mencurahkan banyak tenaga untuk mencari solusi secara analitik, kita akan lebih menyukai solusinya secara numerik, maksudnya, persamaan kalkulus akan diubah menjadi persamaan aljabar atau persamaan linier simultan, dengan sedikit modifikasi tentunya. Dengan mengubah persamaan kalkulus menjadi persamaan aljabar, akan terhindar dari kerumitan kalkulus (seperti integral dan diferensial) dan kemudian memudahkan untuk menyelesaikannya secara numerik (secara perhitungan aljabar biasa, seperti: tambah, kurang, kali, bagi, dsb.). Solusi numeriknya dapat dipecahkan dengan melakukan iterasi pada persamaan aljabar dengan melibatkan banyak variabel. Solusi numerik ini akan lebih dipilih karena pengembangan pada perhitungan iterasi dan juga memiliki komputer yang dapat menghitung iterasi tersebut dengan cepat dan tepat. Tidak seperti solusi analitik, solusi numerik mempunyai *error* perhitungan, yaitu, hasil hitung secara numerik mungkin saja dapat berbeda dengan kenyataannya. Di lain pihak, lebih baik menggunakan solusi numerik daripada harus menunggu solusi analitik yang mungkin tidak akan pernah ada. Optimasi sistem-sistem teknologi dan sains bisa dilakukan dengan



simulasi dan modelling berbasis komputer daripada membuat banyak percobaan yang mahal secara coba-coba.

Persamaan secara analitik (secara kalkulus atau integral-diferensial) hanya untuk kasus-kasus yang sederhana saja, di mana geometri atau bentuk benda pada kasus masih sangat sederhana. Untuk kasus yang melibatkan geometri yang rumit, seperti pada penelitian ini, adalah berbentuk baut, memecahkan persamaan secara analitik terkadang bisa dikatakan mustahil, sebagai gantinya penyelesaian kasus yang rumit secara numerik dengan mengubah persamaan tersebut menjadi persamaan aljabar (diskritisasi persamaan) kemudian mendapatkan solusinya melalui metode iterasi dengan bantuan komputer.

Metode Elemen Hingga adalah salah satu metode numerikal yang digunakan untuk memperkirakan suatu penyelesaian dari berbagai permasalahan di bidang keteknikan. Analisis Elemen Hingga menjadi salah satu langkah yang penting dalam proses pendesainan dan pemodelan fenomena – fenomena fisik yang banyak terjadi di dunia industri. Metode Elemen Hingga berprinsip pada dekomposisi suatu domain atau objek studi menjadi beberapa subdomain atau elemen dengan menerapkan metode residual berbobot atau metode variasional untuk memperkirakan suatu penyelesaian. Analisis menggunakan Metode Elemen Hingga juga dapat digunakan untuk menyatakan variabel dasar yang belum diketahui dari fungsi perkiraan pada setiap elemen. Fungsi ini didefinisikan sebagai hasil dari variabel dasar pada letak yang spesifik dan sering disebut sebagai *nodes*. *Nodes* biasanya terletak pada batas – batas elemen dan berfungsi sebagai penghubung antar elemen yang berdekatan (Madenci, 2015).

Teknik analisis Elemen Hingga merupakan salah satu jenis prosedur numerikal, dimana akurasiya perlu untuk dinilai. Jika akurasiya tidak sesuai dengan kriteria, maka solusi numerikal tersebut harus diulang dengan parameter yang lebih halus (seperti, bentuk *mesh* yang halus) hingga akurasiya dianggap cukup sesuai dengan prosedur metode elemen hingga yang ditunjukkan oleh Gambar 2.27. Metode Elemen Hingga



hanya dapat menyelesaikan model matematika tertentu dan semua asumsi yang digunakan akan berpengaruh terhadap respon dihasilkan. Kita tidak dapat mengharap informasi lain dapa fenomena fisik yang diprediksi selain informasi yang dikandung didalam model matematikanya. Sehingga pemilihan model matematika yang tepat sangatlah penting karena dapat menjelaskan dengan tepat sesuai dengan kenyataan di lapangan (Bathe, 1996).

Dalam analisis Elemen Hingga terdapat tiga pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikan dan memperkirakan solusi dari suatu permasalahan yaitu (Desai, 1971):

1. Pendekatan Langsung

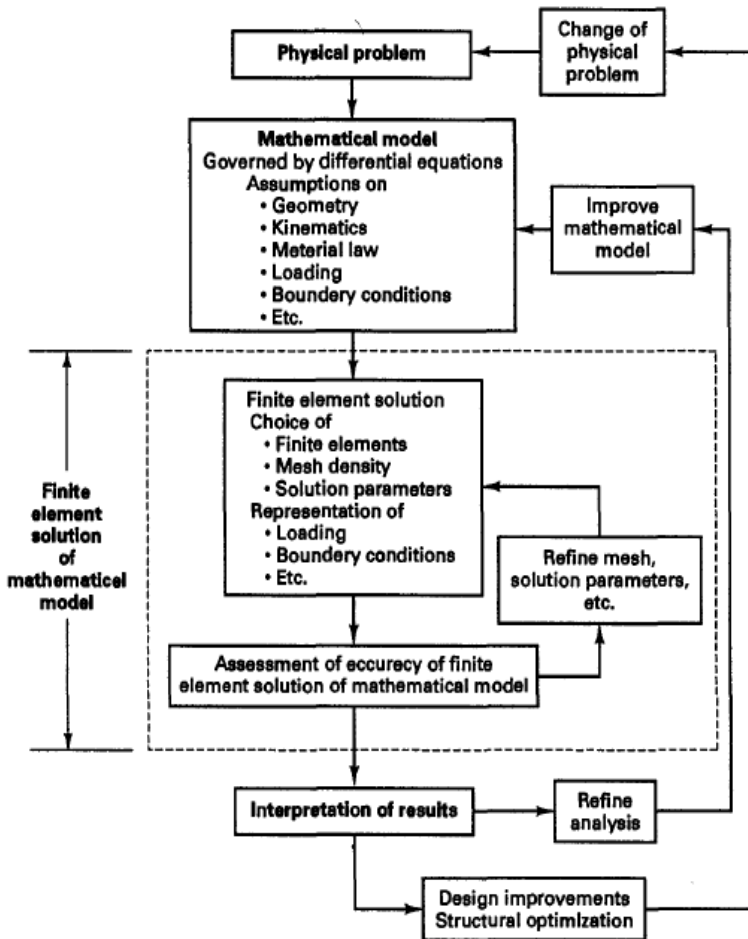
Pendekatan ini digunakan untuk permasalahan yang simpel dan biasanya berfungsi sebagai sarana untuk menjelaskan konsep dasar dari Metode Elemen Hingga.

2. Pendekatan Residual Berbobot

Pendekatan ini adalah metode yang serba guna, karena dapat memperbolehkan penggunaan analisis Elemen Hingga pada suatu permasalahan yang secara fungsional tidak dapat disusun. Pendekatan ini banyak menggunakan persamaan diferensial seperti pada fenomena perpindahan panas dan mekanika fluida.

3. Pendekatan Variasional

Pendekatan ini bergantung pada variasi kalkulus dimana melibatkan fungsi – fungsi ekstrim, seperti pada penentuan energi potensial pada mekanika struktur.



Gambar 2. 27 Prosedur analisis menggunakan metode elemen hingga.

(Sumber: Bathe, 1996)



II. 10 Pengujian Kekerasan

Kekerasan logam didefinisikan sebagai ketahanan terhadap penetrasi, dan memberikan indikasi cepat mengenai perilaku deformasi (Smallman, 2000). Selain itu juga dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk tahan terhadap goresan, pengikisan (abrasi), dan penetrasi. Sifat ini berkaitan erat dengan sifat keausan (wear resistance). Dimana kekerasan ini juga mempunyai korelasi dengan kekuatan.

Uji kekerasan *rockwell* ini juga didasarkan kepada penekanan sebuah *indenter* dengan suatu gaya tekan tertentu kepermukaan yang rata dan bersih dari suatu logam yang diuji kekerasannya. Setelah gaya tekan dikembalikan ke gaya *minor* maka yang dijadikan dasar perhitungan nilai kekerasan *rockwell* bukanlah hasil pengukuran diameter ataupun diagonal bekas lekukan tetapi justru dalamnya bekas lekukan yang terjadi itu. Inilah kelainan cara *rockwell* dibandingkan dengan cara pengujian kekerasan lainnya.

Pengujian *rockwell* yang umumnya biasa dipakai ada ke jenis yaitu HRA, HRB, dan HRC. HR itu sendiri merupakan suatu singkatan dari kekerasan *rockwell* atau *rockwell hardness number* dan kadang-kadang disingkat dengan huruf R saja.

Pengujian kekerasan dengan metode *rockwell* ini diatur berdasarkan standar DIN 50103. Tingkat skala kekerasan menurut metode *rockwell* adalah berdasarkan pada jenis *indenter* yang digunakan pada masing-masing skala. Dalam metode *rockwell* ini terdapat dua macam *indenter* yang ukurannya bervariasi, kedua jenis *indenter* itu adalah:

- a) Kerucut intan dengan besar sudut 120^0 , dikenal pula dengan “*Rockwell cone*”.
- b) Bola baja dengan berbagai ukuran, dikenal pula dengan “*Rockwell*”. Untuk cara pemakaian skala ini, lebih dahulu ditentukan dan dipilih ketentuan angka kekerasan maksimum yang boleh digunakan oleh skala tertentu. Jika pada skala tertentu tidak tercapai angka kekerasan yang akurat, maka kita tentukan skala lain



yang dapat menunjukkan angka kekerasan yang jelas. Sebagaimana rumus tertentu, maka skala memiliki standar atau acuan. Untuk mendapatkan nilai HRB harus menggunakan sebuah *indentor* berupa bola baja yang disepuh dengan ukuran $\varnothing 1/16"$ dan ini digunakan untuk jenis logam yang tidak mendapatkan perlakuan pengerasan sebelumnya (sepuh) dan untuk semua jenis *non-ferrous* dalam kondisi padat. Sedangkan untuk mendapatkan nilai HRC digunakan sebuah *indentor* kerucut *diamond* yang memiliki sudut puncak 120° yang ujungnya dibundarkan dengan jari-jari 0,2 mm dan dipakai untuk menentukan kekerasan baja-baja yang telah dikeraskan. Kerucut *diamond* biasa disebut juga "*brale*".

Bahan-bahan atau perlengkapan yang dipakai untuk pengujian kekerasan *rockwell* adalah sebagai berikut: 1) Mesin pengujian kekerasan *rockwell* 2) *Indentor* (*penetrator*) berupa bola baja yang disepuh dengan ukuran $\varnothing 1/16"$ dan kerucut intan dengan besar sudut 120° 3) Mesin gerinda 4) Amplas kasar dan halus 5) Benda uji (*test specimen*)

Mesin uji kekerasan *rockwell* (*rockwell hardness test*) harus dipelajari dulu secara seksama. Mesin yang ada merupakan mesin yang digunakan untuk uji *rockwell* HRA, HRB, HRC, HRD, HRF, HRG selanjutnya sebelum dimulai pengujian *indentor* harus dipasang terlebih dahulu sesuai dengan jenis pengujian yang diperlukan baik itu *indentor* bola baja maupun kerucut *diamond*. Setelah *indentor* terpasang, letakan *specimen* yang akan diuji kekerasannya ditempat yang tersedia dan menyetel beban yang akan digunakan untuk proses penekanan. Nilai 8 kekerasan dapat dilihat pada jarum yang terpasang pada alat ukur berupa *dial indicator pointer*. Perhitungan kekerasan Rockwell menggunakan persamaan berikut:

$$HR = E - e \quad (2. 25)$$

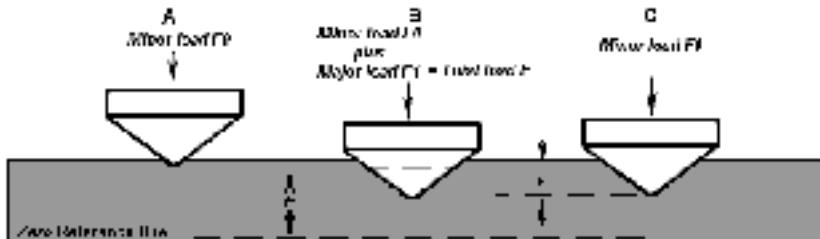


dimana,

e = kedalaman akibat beban mayor F_1 dihitung dalam unit 0.002 mm

E = konstanta indenter: 100 untuk indenter berupa intan, 130 untuk indenter berupa bola baja

HR = Rockwell hardness number



Gambar 2. 28 Mekanisme pengujian rockwel.

(Callister. 2009)

Tabel 2. 4 Macam - macam skala pengujian kekerasan Rockwell.

Skala	Indenter	Beban minor F_0 kgf	Beban mayor F_1 kgf	Beban total F kgf	Nilai E
A	Diamond cone	10	50	60	100
B	1/16" steel ball	10	90	100	130
C	Diamond cone	10	140	150	100
D	Diamond cone	10	90	100	100
E	1/8" steel ball	10	90	100	130
F	1/16" steel ball	10	50	60	130



G	1/16" steel ball	10	140	150	130
H	1/8" steel ball	10	50	60	130
K	1/8" steel ball	10	140	150	130
L	1/4" steel ball	10	50	60	130
M	1/4" steel ball	10	90	100	130
P	1/4" steel ball	10	140	150	130
R	1/2" steel ball	10	50	60	130
S	1/2" steel ball	10	90	100	130
V	1/2" steel ball	10	140	150	130

(Sumber: <http://www.alatuji.com>)

Tipe Aplikasi dari Skala Kekerasan Rockwell

HRA: Karbida semen, baja tipis

HRB: Paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, baja malleable.

HRC: Baja, Besi tuang keras, dan material yang lebih keras dari 100 HRB

HRD: Baja tipis, dan baja malleable pearlitik

HRE: Baja tuang, aluminium, dan magnesium alloy, logam bearing

HRF: Tembaga alloy yang diannealing, lembar logam tipis dan lunak

HRG: Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons

HRH: Aluminium, zinc, lead

HRK: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

HRL: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak



HRM: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

HRP: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

HRR: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

HRS: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

HRV: Soft bearing metals, plastics dan material lain yang sangat lunak

II. 11 Hardenability

Kekerasan baja setelah dikeraskan terutama tergantung pada banyaknya martensit yang terjadi dan kekerasan martensitnya sendiri. Kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam martensit, dan kadar karbon dalam martensit ini tergantung pada kadar karbon yang larut dalam austenit.

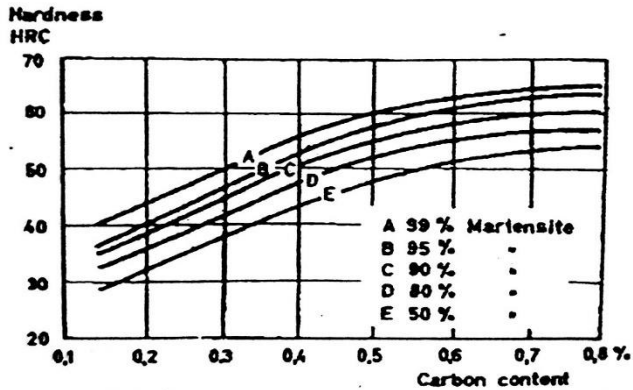
Karbon yang ada dalam baja belum tentu seluruhnya berpengaruh terhadap kekerasan martensit, karbon yang tetap berupa senyawa/karbida pada saat temperatur austenisasi tidak akan ikut dalam reaksi pembentukan martensit, jadi tidak akan menambah kekerasan. Hubungan antara kekerasan baja (setelah pengerasan) dengan kadar karbon dan jumlah martensit digambarkan pada gambar 2.29.

Hardenability adalah kemampuan baja untuk dapat dikeraskan dengan membentuk martensit. Hardenability menggambarkan dalalmnya pengerasan yang diperoleh dengan pengerasan, biasanya dinyatakan dengan jarak suatu titik dibawah permukaan dimana strukturnya terdiri dari 50% martensit (dianggap bahwa pengerasan terjadi bila terjadi martensit sebanyak 50%). Suatu baja dikatakan mempunyai hardenability tinggi bila baja itu memperlihatkan tebal pengerasan (*depth of hardening*) yang besar atau dapat mengeras pada seluruh penampang dari suatu benda yang cukup besar.



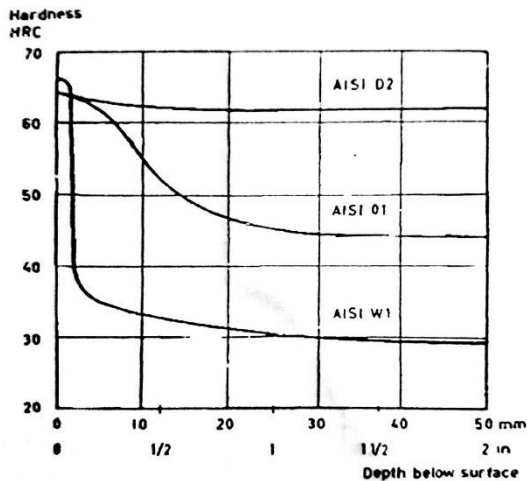
Tiga jenis baja (AISI W1, 01 dan D2) masing-masing dibentuk menjadi sebuah batang berdiameter 100 mm, setelah dikeraskan (W1 didinginkan dengan pendinginan air dan yang lain

ampang
gambar



Gambar 2. 29 Hubungan antara kekerasan, kadar karbon dan jumlah martensit.

(Callister. 2009)

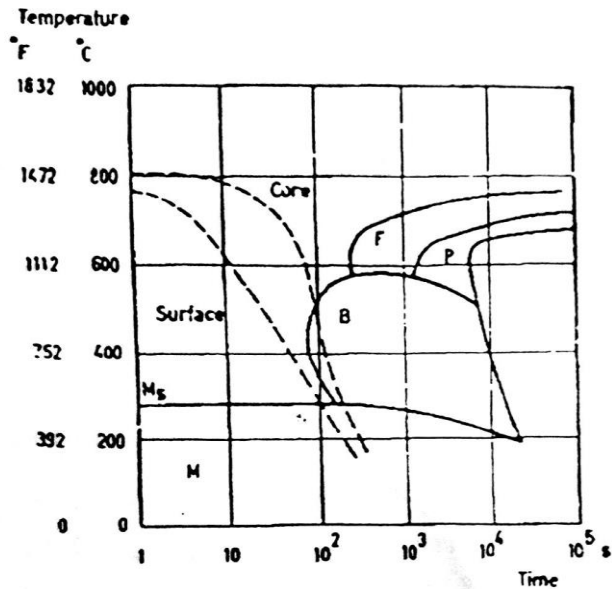


Gambar 2. 30 Distribusi kekerasan batang berdiameter 100mm dari beberapa jenis baja.

(Callister. 2009)

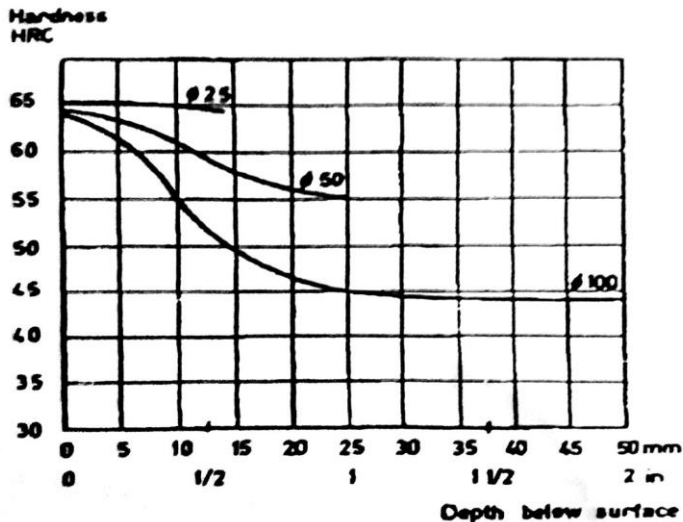
Ketiga baja ini mempunyai kekerasan maksimum (pada permukaan) yang hampir sama, tetapi baja AISI D2 memperlihatkan distribusi kekerasan yang merata, sedang AISI W1 menjadi keras hanya pada lapisan permukaan saja. Dikatakan baja AISI D2 mempunyai hardenability yang tertinggi sedang W1 yang terendah (walaupun kekerasannya sedikit lebih tinggi daripada D2).

Turunnya kekerasan pada bagian yang lebih dalam dari suatu benda terjadi karena laju pendinginan pada bagian yang lebih dalam lebih rendah, sehingga bila laju pendinginan itu lebih rendah daripada CCR maka martensit yang terbentuk kurang dari 100% (lihat gambar 2.31), dengan demikian kekerasannya akan lebih rendah. Makin ke dalam laju pendinginan makin rendah, sehingga kekerasannya juga makin rendah.



Gambar 2. 31 Kurva pendinginan pada permukaan dan inti batang berdiameter 95 mm yang dicelup (quench) minyak. Permukaan seluruhnya martensit, di inti mengandung juga sedikit bainit.

(Callister. 2009)



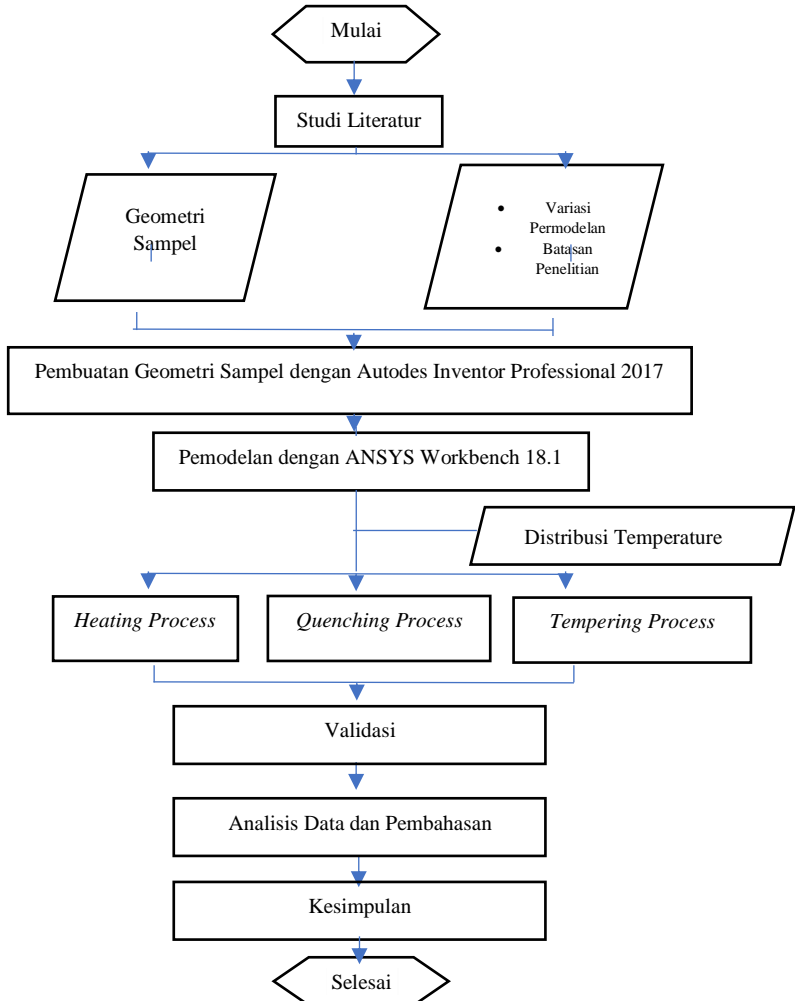
Gambar 2. 32 Distribusi kekerasan batang berbagai diameter, terbuat dari baja O1 setelah dicelup minyak.

(Callister. 2009)

Pada benda yang lebih besar, laju pendinginannya lebih rendah, karena itu dari baja yang sama, tebal pengerasannya lebih tipis seperti pada gambar 2.32. Pada batang dengan diameter 25 mm intinya juga mencapai kekerasan 65 HRC, sedang pada batang yang lebih besar hanya dipermukaannya saja yang mencapai 65 HRC, bahkan pada batang dengan diameter 100 mm mulai kedalaman 25 mm dapat dikatakan tidak mengalami pengerasan.

BAB III METODOLOGI

III. 1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Percobaan



III. 2 Material Penelitian

III. 2.1 Material Objek Penelitian

Spesifikasi material yang dijadikan penelitian adalah material baut dengan standar DIN 931 M 20 x 65 dengan material Baja S45C.

Tabel 3. 1 Komposisi Material Baut (S45C)

Kode	Kadar (%)					
	C	Si	Mn	Mo	P	S
AISI 1045	0,40-0,45	0,10-0,30	0,60-0,90	0,025	0,04 max	0,05 max

(Agus Pramono. 2011)

Adapun spesifikasi sifat thermal dari material S45C adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Sifat Thermal Baja AISI 1045

Material	Konduktivitas Thermal	Densitas	Kapasitas Panas Spesifik
AISI 1045	49,8 W/m.K	7.850 kg/m ³	0,486 J/g ⁰ C

(Sumber: <http://www.matweb.com>)

III.2.2 Geometri Sampel Uji

Geometri untuk penelitian ini adalah dengan objek baut pengencang dengan standar DIN 931 M 20 x 65.

[illegible]

Gambar 3. 2 Standar DIN 931.

(Sumber: Dokumen PT. Timur Megah Steel)



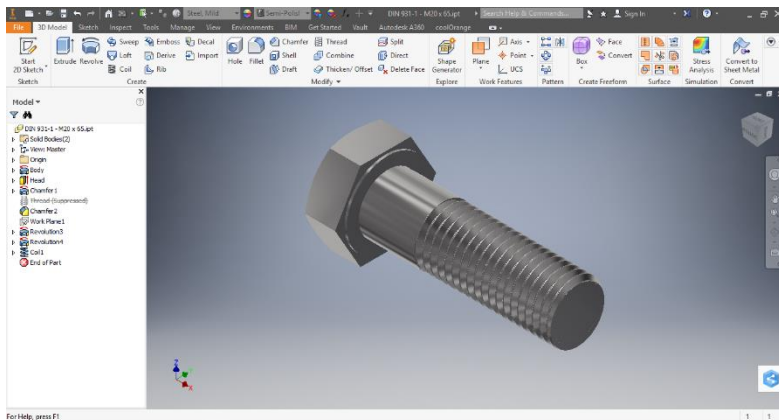
III. 3 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

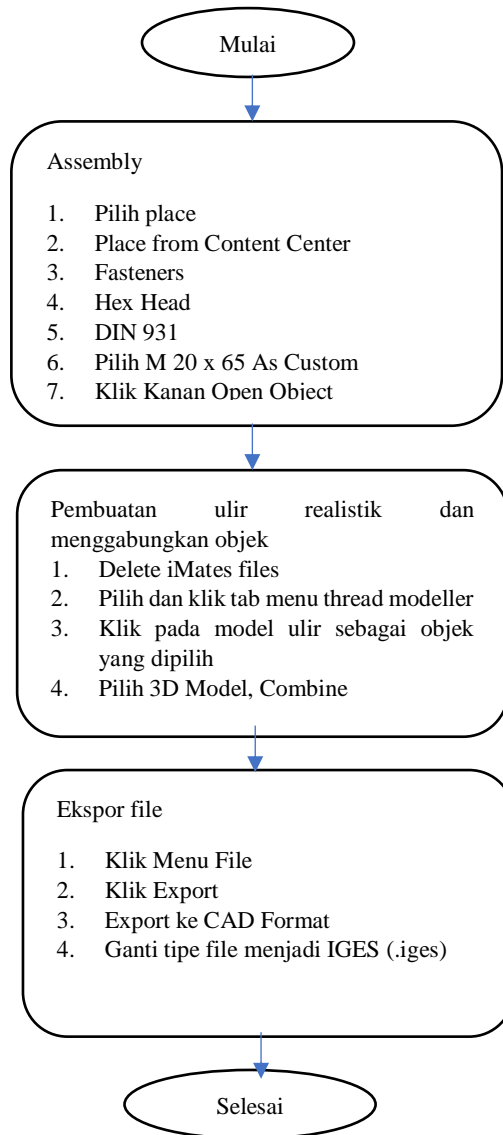
1. Autodesk Inventor 2017 Professional adalah salah satu software CAD yang digunakan untuk membuat desain 3D dari baut yang hasilnya kemudian diimport ke dalam software ANSYS dengan format (*file.iges*).
2. ANSYS Workbench 18.1 adalah salah satu software simulasi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada proses pengerasan (*hardening process*) dan menganalisis distribusi temperatur yang terjadi berbasis metode elemen hingga.

III. 4 Pembuatan Geometri Baut dengan Software Autodesk Inventor Professional 2017

Diagram alir dari pembuatan geometri baut berstandar DIN 931 M20 x 65 (baut berdiameter 20mm dan panjang 65mm) menggunakan software Autodesk Inventor Professional 2017 dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Hasil pembuatan geometri baut

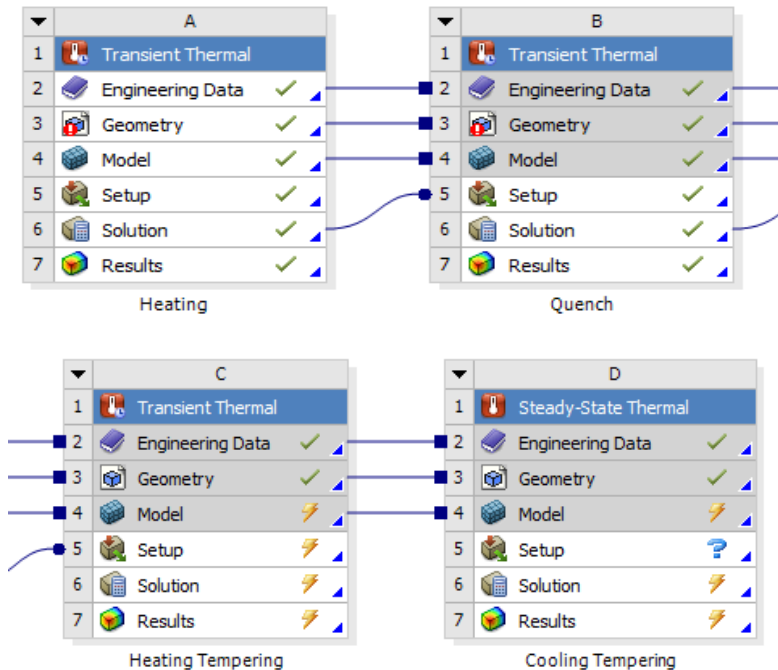


Gambar 3. 4 Diagram alir pembuatan geometri.



III. 5 Permodelan dengan ANSYS Workbench 18.1

Diagram alir dari pemodelan distribusi temperatur dari proses *hardening* dan *tempering* pada geometri baut dengan menggunakan ANSYS Workbench 18.1 dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Diagram alir Simulasi.

III. 5.1 Engineering Data

Dalam penelitian ini, digunakan material S45C sebagai material tubuh baut. Pada *engineering data*, sifat yang memenuhi pada material tersebut, terutama sifat thermal seperti konduktivitas thermal, kapasitas panas spesifik, dan densitas digunakan dalam simulasi ini.



Outline of Schematic A2, B2, C2, D2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	SC45			
4	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: SC45				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Thermal Conductivity	49,8	W m ⁻¹ K ⁻¹	
5	Specific Heat	486	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Gambar 3. 6 Input Engineering Data

III. 5.2 Geometry

Pada penelitian ini proses pemasukan geometri dilakukan dengan meng-impor geometri yang sebelumnya sudah dibuat menggunakan software Autodesk Inventor Professional 2017 dengan format file adalah IGES (.iges).

III. 5.3 Model

Pada tahap model, akan dilakukan *meshing* terhadap objek. Dimana minimum edge length bernilai $1,18 \cdot 10^{-5} \text{m}$. *Physic preference* yang digunakan adalah tipe mechanical dan dengan elemen order menggunakan opsi *program controlled* supaya mendapatkan hasil yang lebih optimum.

III. 5.4 Setup

Pada bagian *setup*, terbagi menjadi 4 proses. Proses yang pertama adalah *heating*, dimana menggunakan nilai *initial temperature* sebesar 35°C dan perpindahan panas secara konveksi dengan koefisien konveksi sebesar $11,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ambient temperatur sebesar 850°C .

Pada proses *quenching*, menggunakan hubungan dengan proses sebelumnya (*heating*), yaitu *initial temperature* sesuai pada



keadaan temperatur akhir pada proses sebelumnya. Perpindahan panas secara konveksi dengan koefisien konveksi sebesar $1.250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ambient temperatur sebesar 55°C .

Pada proses *heating tempering*, menggunakan hubungan dengan proses sebelumnya, yaitu *initial temperature* sesuai pada keadaan temperatur akhir pada proses sebelumnya (*quenching*). Perpindahan panas secara konveksi dengan koefisien konveksi sebesar $10,31 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ambient temperatur sebesar 450°C .

Pada proses *cooling tempering*, menggunakan hubungan dengan proses sebelumnya, yaitu *initial temperature* sesuai pada keadaan temperatur akhir pada proses sebelumnya (*heating tempering*). Perpindahan panas secara konveksi dengan koefisien konveksi sebesar $10,49 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ambient temperatur sebesar 35°C .

III. 5.5 Solution

Pada bagian *setup*, terbagi menjadi 4 proses. Proses yang pertama adalah *heating*, dimana menggunakan analisis distribusi temperatur selama 15 menit, 30 menit dan 1 jam.

Kedua, adalah pada proses *quenching*, dimana menggunakan analisis distribusi temperatur selama 5 detik, 10 detik 15 detik, 20 detik dan 30 detik.

Ketiga adalah pada proses *heating tempering*, dimana menggunakan analisis distribusi temperatur selama 15 menit dan 30 menit.

Keempat adalah proses *cooling tempering*, dimana menggunakan analisis distribusi temperatur secara steady state.

III. 5.6 Result

Pada bagian ini menampilkan hasil dari simulasi distribusi temperatur untuk masing-masing proses dengan kondisi tertentu.

III. 5.7 Validasi

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini kemudian akan divalidasi dengan mengkorelasikan hubungan antara distribusi temperatur yang terjadi dengan nilai kekerasan berdasarkan data kekerasan dari Departemen Quality Control PT. Timur Megah Steel untuk baut DIN 931 M20 x 65 untuk meninjau proses



produksi yang saat ini sedang berlaku terhadap kadar struktur mikro martensit yang terjadi.

III.6 Standar Sifat Mekanik Baut

Sifat mekanik baut berdasarkan pada standar ISO 898-1, untuk baut dengan grade 8.8 dimana:

Property class	Material and heat treatment	Chemical composition limits (cast analysis, %)*					Tempering temperature °C min.
		C min.	C max.	P max.	S max.	B ^b max.	
4.6 ^{c, d}	Carbon steel or carbon steel with additives	—	0,55	0,050	0,060	Not specified	—
4.8 ^e		—	0,55	0,050	0,060		
5.6 ^e		—	0,55	0,050	0,060		
6.8 ^e		—	0,55	0,050	0,060		
8.8 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 ^a	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
9.8 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 ^a	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
10.9 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,20 ^a	0,55	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
12.9 ^{f, h, i}	Alloy steel quenched and tempered ^g	0,30	0,50	0,025	0,025	0,003	425
12.9 ^{f, h, i}	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr or Molybdenum) quenched and tempered	0,28	0,50	0,025	0,025	0,003	380

^a In case of dispute, the product analysis applies.
^b Boron content can reach 0,005 %, provided that non-effective boron is controlled by addition of titanium and/or aluminium.
^c For cold forged fasteners of property classes 4.6 and 5.6, heat treatment of the wire used for cold forging or of the cold forged fastener itself may be necessary to achieve required ductility.
^d Free cutting steel is allowed for these property classes with the following maximum sulphur, phosphorus and lead contents: sulphur 0,34 %, phosphorus 0,11 %, lead 0,35 %.
^e In case of plain carbon boron steel with a carbon content below 0,25 % (cast analysis), the minimum manganese content shall be 0,6 % for property class 4.6 and 0,7 % for 4.8 and 10.9.
^f For the materials of these property classes, there shall be a sufficient hardenability to ensure a structure consisting of approximately 90 % martensite in the core of the threaded sections for the fasteners in the "as-hardened" condition before tempering.
^g This alloy steel shall contain at least one of the following elements in the minimum quantity given: chromium 0,30 %, nickel 0,30 %, molybdenum 0,20 %, vanadium 0,10 %. Where elements are specified in combinations of two, three or four and have alloy contents less than those given above, the limit value to be applied for steel class determination is 70 % of the sum of the individual limit values shown above for the two, three or four elements concerned.
^h A metallurgically detectable white phosphorus enriched layer is not permitted for property class 12.9/12.9. It shall be detected by a suitable test method.
ⁱ Caution is advised when the use of property class 12.9/12.9 is considered. The capability of the fastener manufacturer, the service conditions and the wrenching methods should be considered. Environments may cause stress corrosion cracking of fasteners as processed as well as those coated.

Gambar 3. 7 Standar ISO 898-1



Adapun standar pengujian kekerasan berdasarkan ISO 898-1 tersebut adalah,
ISO 898-1:2009(E)

NOTE There may not be a direct relationship between hardness and tensile strength. Maximum hardness values are specified for reasons other than theoretical maximum strength consideration (e.g. to avoid embrittlement).

Hardness may be determined either on a suitable surface or on a transverse section through the threaded portion.

9.9.2 Applicability

This test applies to fasteners having the following specifications:

- all sizes;
- all property classes.

9.9.3 Test methods

Hardness may be determined using the Vickers, Brinell or Rockwell hardness test.

a) Vickers hardness test

The Vickers hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6507-1.

b) Brinell hardness test

The Brinell hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6506-1.

c) Rockwell hardness test

The Rockwell hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6508-1.

9.9.4 Test procedure

9.9.4.1 General

Fasteners used for hardness tests shall be as received.

9.9.4.2 Hardness determined on a transverse section through the threaded portion

A transverse section shall be taken 1 d back from the end of the thread, and the surface shall be suitably prepared.

Take hardness readings in the area between the axis and the half-radius position, see Figure 8.



Key

- 1 axis of the fastener
- 2 half-radius area with a radius of 0,25 d

Figure 8 — Half-radius area for taking of hardness readings



9.9.4.3 Hardness determined on a surface

The hardness shall be determined on flat surfaces of the head, on the end of the fastener or on the unthreaded shank after removal of any plating or other coating and after suitable preparation of the test specimen.

This method may be used for routine inspection.

9.9.4.4 Test load for hardness determination

Carry out the Vickers hardness test with a minimum load of 98 N.

Carry out the Brinell hardness test with a load equal to $30 D^2$ expressed in newtons.

9.9.5 Requirements

For fasteners which cannot be tensile tested and structural bolts with short thread length which are tensile tested, with free threaded length $l_{th} < 1 d$, the hardness shall be within the hardness range specified in Table 3.

For fasteners which can be tensile tested, with free threaded length $l_{th} \geq 1 d$, and fasteners with waisted shank and machined test pieces, the hardness shall not exceed the values for maximum hardness according to Table 3.

For fasteners of property classes 4.6, 4.8, 5.6 and 5.8, the hardness determined in accordance with 9.9.4.3 at the end of the fastener shall not exceed the values for maximum hardness according to Table 3.

For heat treated fasteners, if any difference in hardness values determined in the half-radius area (see Figure 8) is greater than 30 HV, it shall be verified that the requirements of 90 % content of martensite has been achieved (see Table 2).

For work hardened fasteners of property classes 4.8, 5.8 and 6.8, hardness determined in accordance with 9.9.4.2 shall be within the hardness range specified in Table 3.

In case of dispute, Vickers hardness test according to 9.9.4.2 shall be the referee test method.

Gambar 3. 8 Standar Pengujian Kekerasan ISO 898-1

III.7 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian yang dilakukan adalah dengan melakukan simulasi distribusi temperatur akibat proses pengerasan (*hardening process*) pada material Baja S45C dengan geometri baut standar DIN 931 M20 x 65 sehingga diperoleh nilai kekerasan untuk dikorelasikan dengan kadar struktur mikro martensit. Proses pembuatan geometri menggunakan *software* Autodesk Inventor Professional 2017, kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi distribusi temperatur secara *transient thermal* menggunakan



software Ansys Workbench 18.1. Pada proses simulasi secara *transient thermal* menggunakan *software* Ansys Workbench 18.1, analisis dibatasi pada proses perpindahan panas secara konveksi dan dipilih dua tahapan simulasi, yaitu: Proses *Heating* dan Proses *Quenching*. Pada tahapan yang pertama, yaitu proses *heating*, digunakan nilai koefisien konveksi untuk keadaan *natural convection* pada medium udara bertemperatur 850°C dengan nilai koefisien konveksi sebesar 11,24 W/m².K. Kemudian pada tahapan yang kedua, yaitu proses *quenching* digunakan nilai koefisien konveksi untuk keadaan *forced convection* pada medium oli dengan temperatur 450°C dengan nilai koefisien konveksi sebesar 1.250 W/m².K. Pada tahapan yang ketiga, *heating tempering*, digunakan nilai koefisien konveksi untuk keadaan *natural convection* pada medium udara bertemperatur 450°C dengan nilai koefisien konveksi sebesar 10,31 W/m².K. Pada tahap keempat yaitu *cooling tempering*, digunakan nilai koefisien konveksi untuk keadaan *natural convection* pada medium udara bertemperatur 35 °C dengan nilai koefisien konveksi sebesar 10,49 W/m².K. Setelah proses simulasi selesai, selanjutnya dilakukan analisis dan pengkajian terhadap nilai distribusi temperatur dengan nilai kekerasan untuk dikorelasikan dengan kadar struktur mikro martensit.

Tabel 3. 3 Koefisien Konveksi dari Berbagai Proses Laku Panas

Proses	Koefisien Konveksi (W/m ² K)
Heating	11,24
Quenching	1.250
Heating Tempering	10,31
Cooling Tempering	10,49

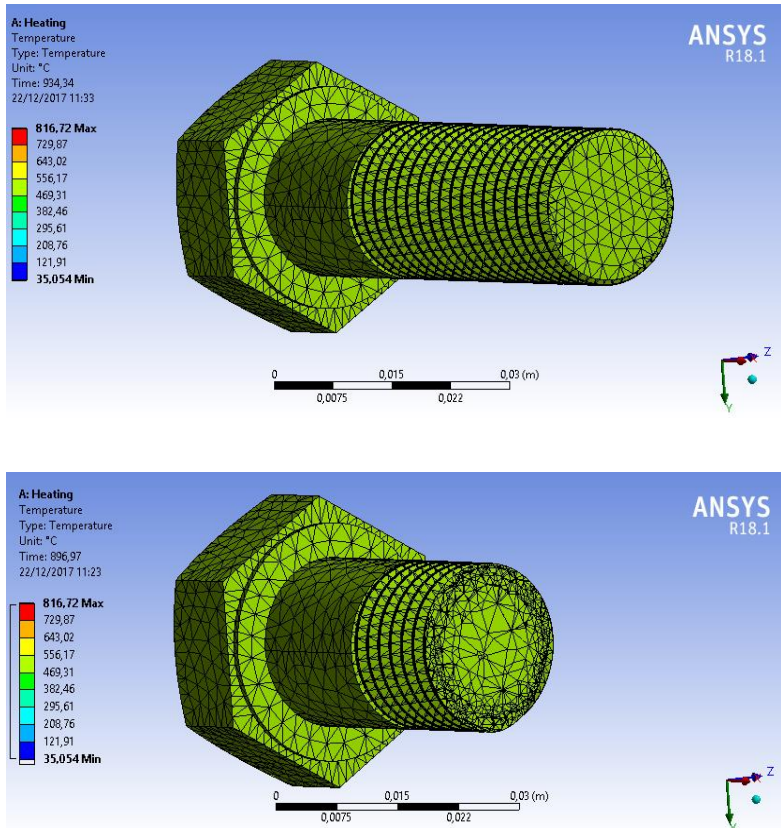
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

IV. 1 Analisa Data

A. Hasil Distribusi Temperatur pada Proses *Heating*

a. Gambar Distribusi Temperatur

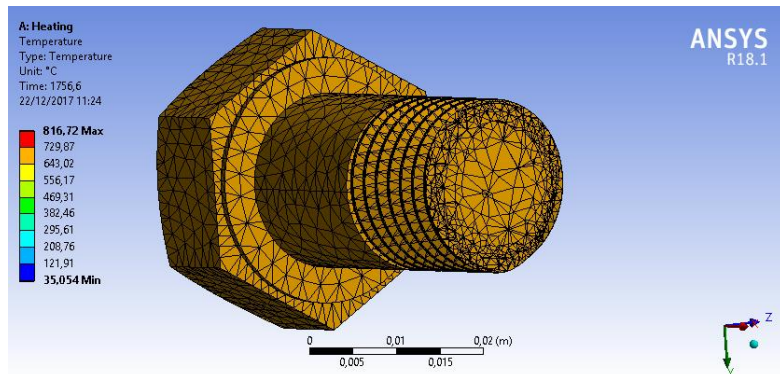
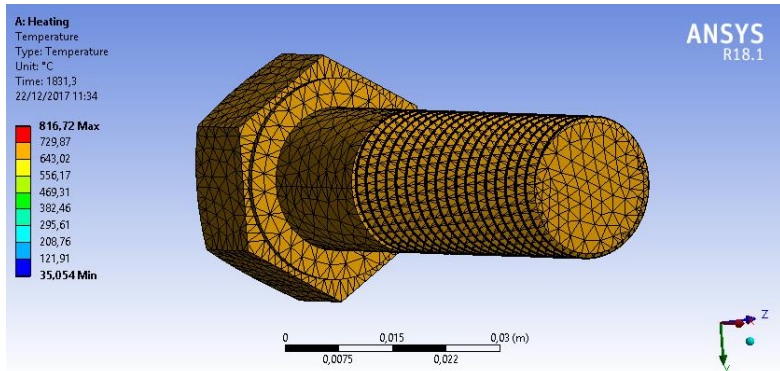
i. Pada saat $t = 15$ menit



Gambar 4. 1 Distribusi temperatur proses heating pada $t = 15$ menit.



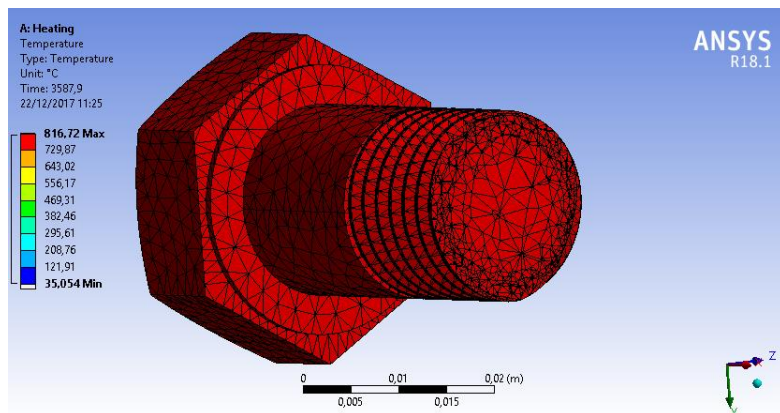
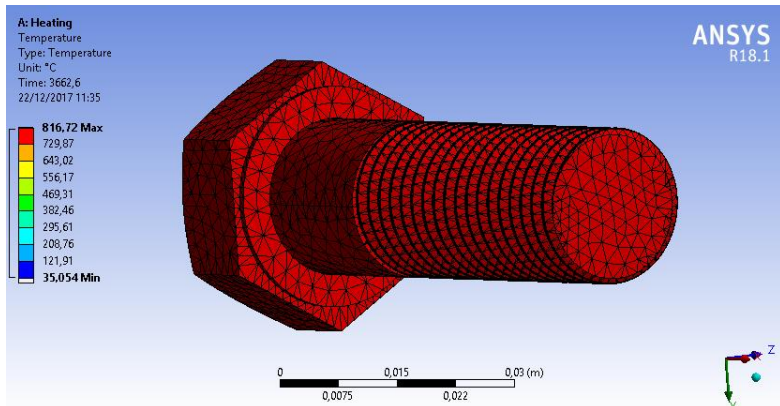
ii. Pada saat $t = 30$ menit



Gambar 4. 2 Distribusi temperatur proses heating pada $t = 30$ menit.



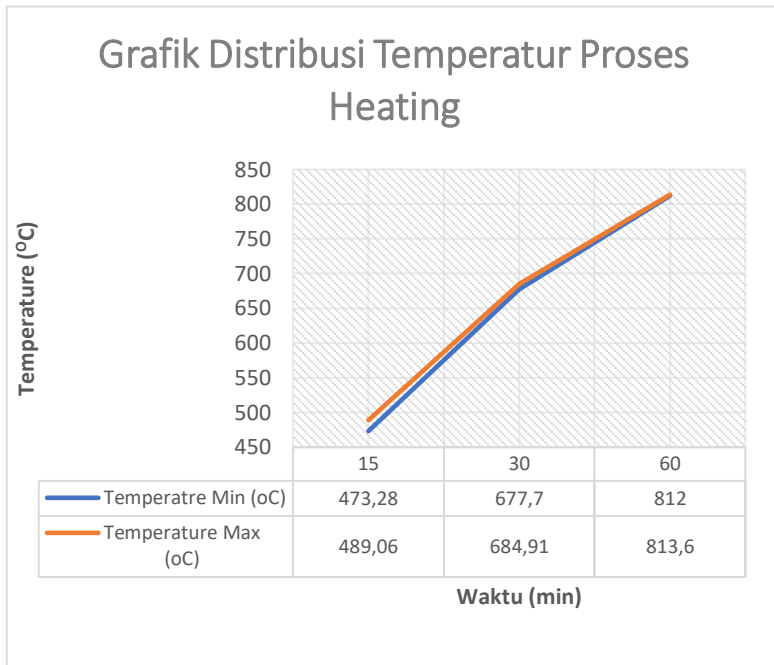
iii. Pada saat $t = 60$ menit



Gambar 4. 3 Distribusi temperatur proses heating pada $t = 60$ menit.



b. Grafik Distribusi Temperatur



Gambar 4. 4 Grafik Distribusi Temperatur Pada Proses Heating

c. Tabel Distribusi Temperatur

Tabel 4. 1 Distribusi temperatur pada proses heating.

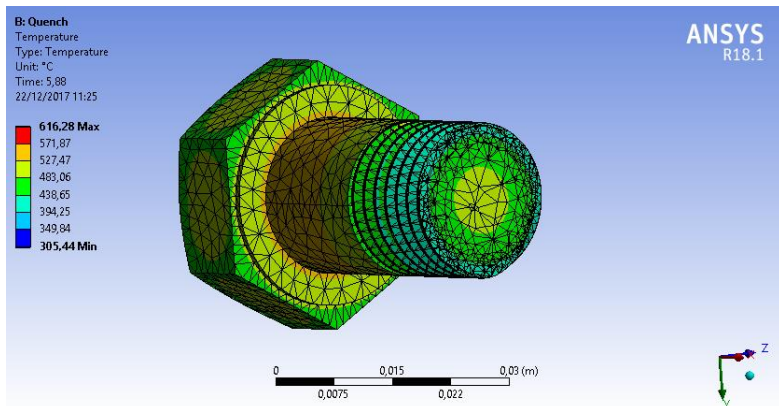
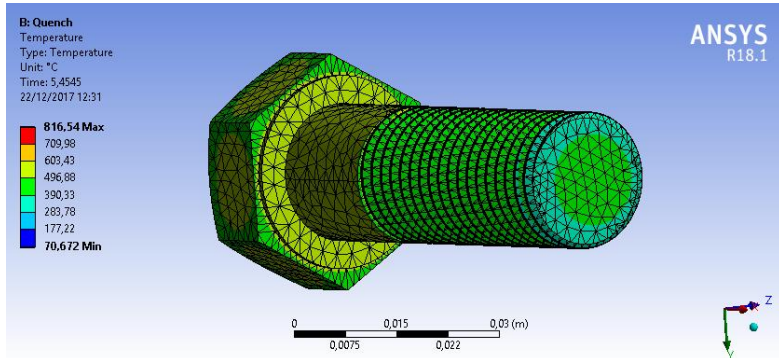
Waktu (s)	T min (°C)	T max (°C)
900	473,28	489,06
1800	677,7	684,91
3600	812	813,6



B. Hasil Distribusi Temperatur pada Proses *Quenching*

a. Gambar Distribusi Temperatur

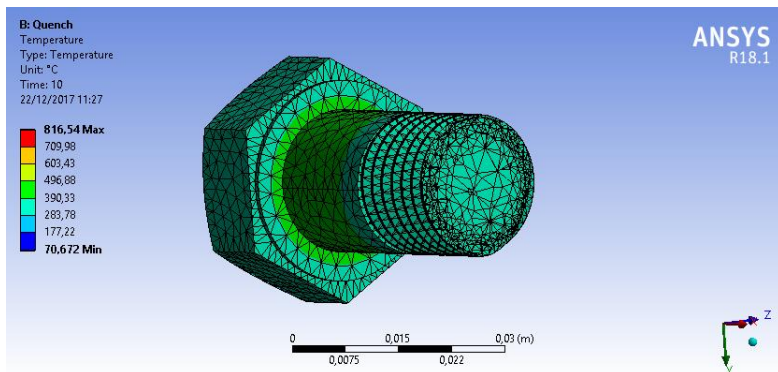
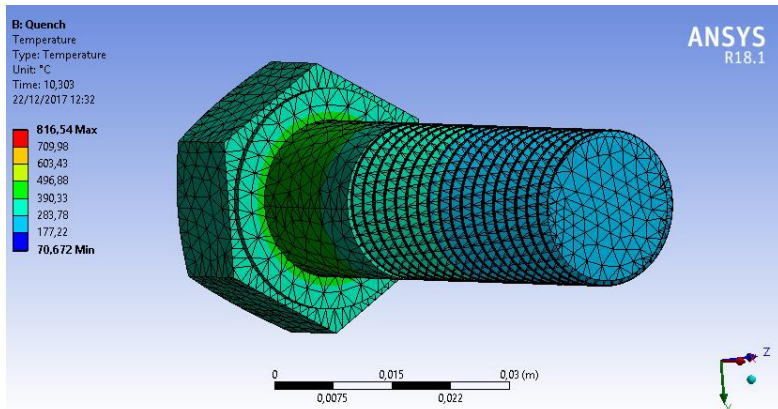
i. Pada saat $t = 5$ s



Gambar 4. 5 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 5$ s.



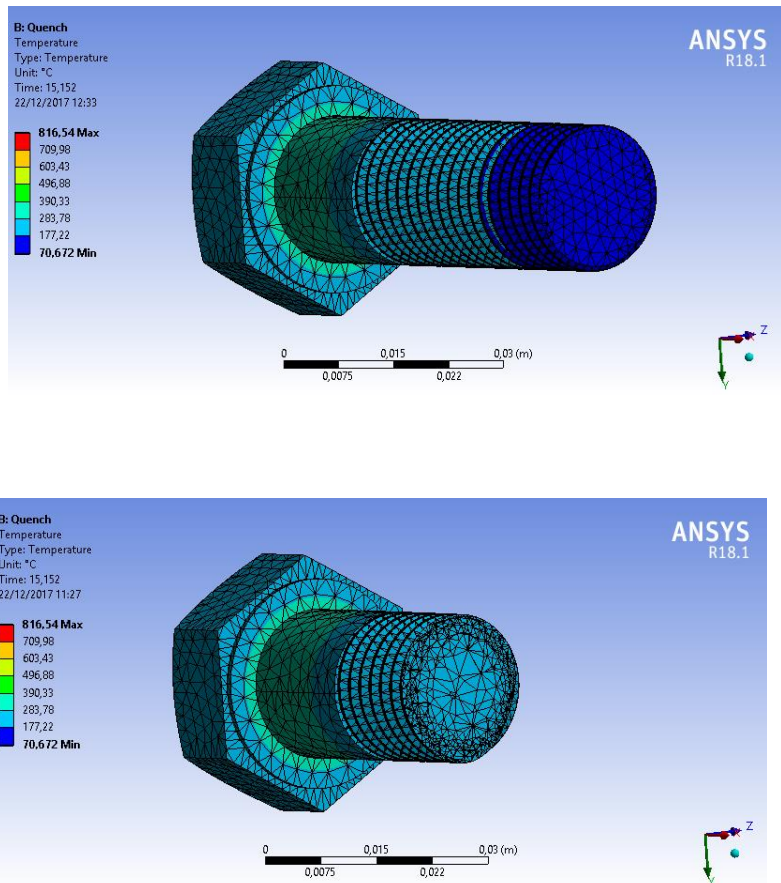
ii. Pada saat $t = 10$ s



Gambar 4. 6 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 10$ s.



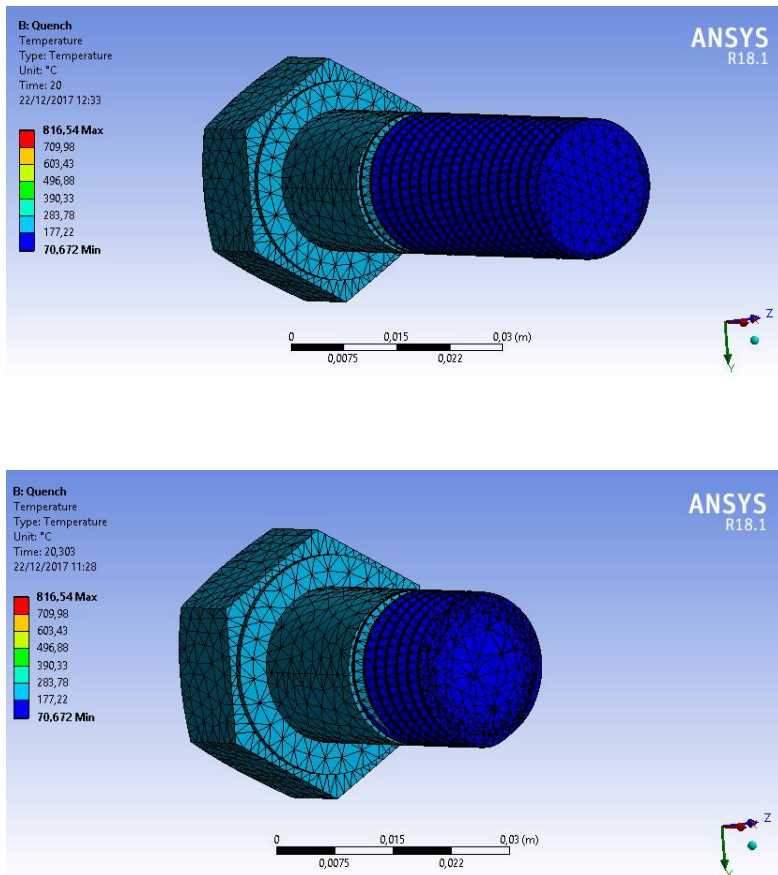
iii. Pada saat $t = 15$ s



Gambar 4. 7 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 15$ s.



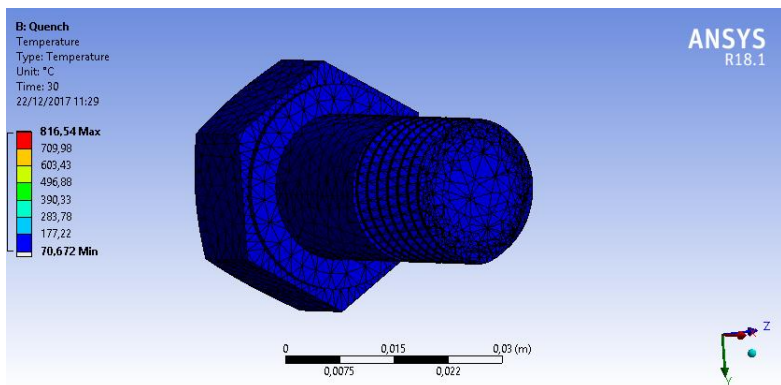
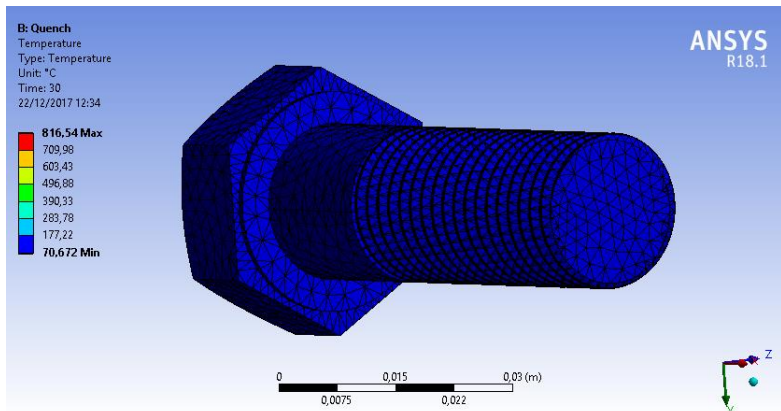
iv. Pada saat $t = 20$ s



Gambar 4. 8 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 20$ s.



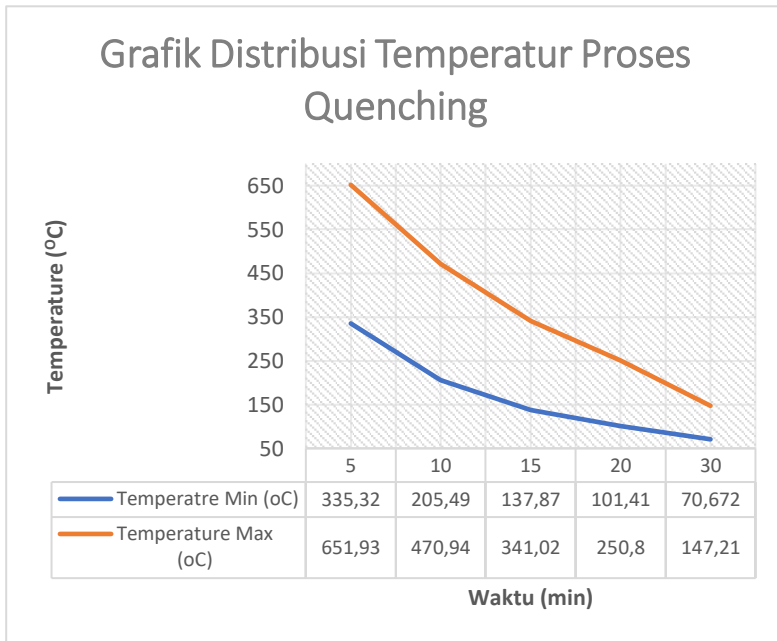
v. Pada saat $t = 30$ s



Gambar 4. 9 Distribusi temperatur proses quenching pada $t = 30$ s.



b. Grafik Distribusi Temperatur



Gambar 4. 10 Grafik Distribusi Temperatur Pada Proses Quenching

c. Tabel Distribusi Temperatur

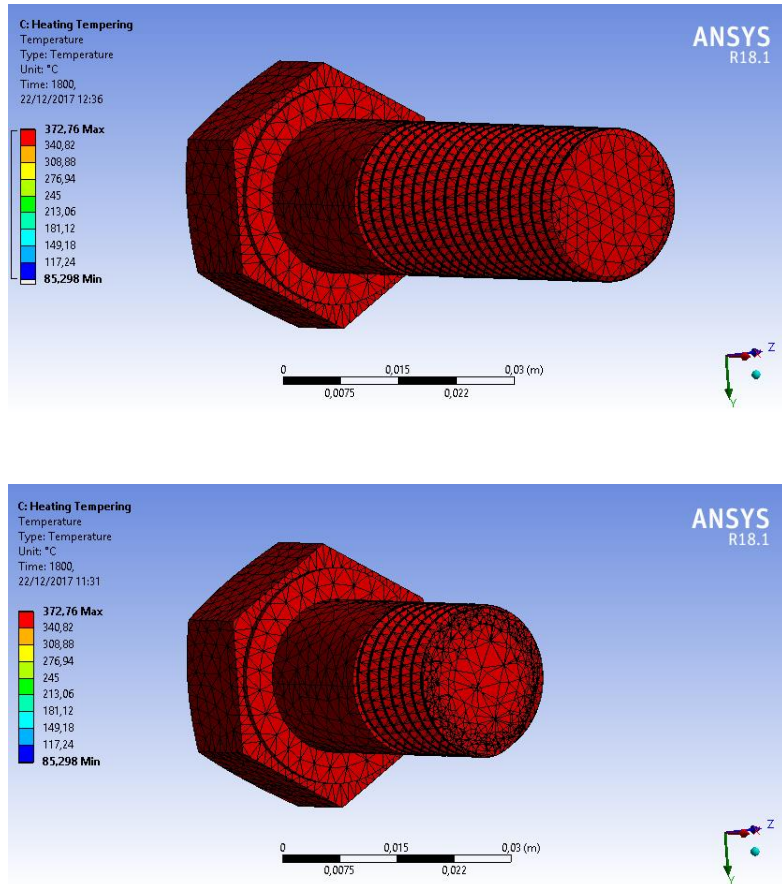
Tabel 4. 2 Distribusi temperatur pada proses quenching.

Waktu (s)	T min (⁰ C)	T max (⁰ C)
5	335,32	651,93
10	205,49	470,94
15	137,87	341,02
20	101,41	250,8
30	70,672	147,21



C. Hasil Distribusi Temperatur pada Proses *Heating Tempering*

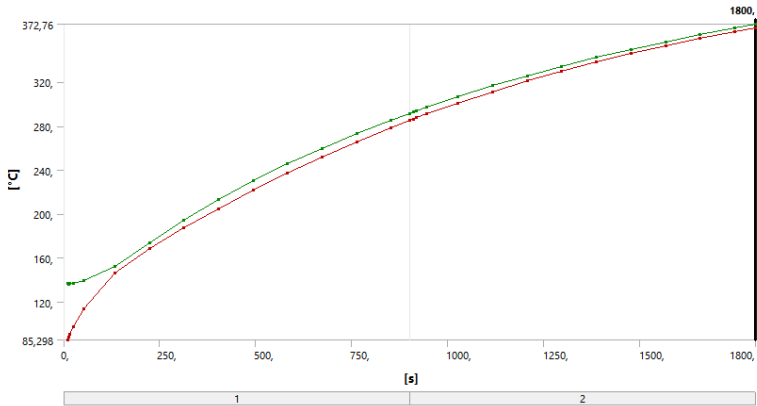
a. Gambar Distribusi Temperatur



Gambar 4. 11 Distribusi temperatur proses heating of tempering.



- b. Grafik Distribusi Temperatur
i. Pada saat $t = 30$ menit



Gambar 4. 12 Grafik distribusi temperatur proses heating of tempering.

- c. Tabel Distribusi Temperatur

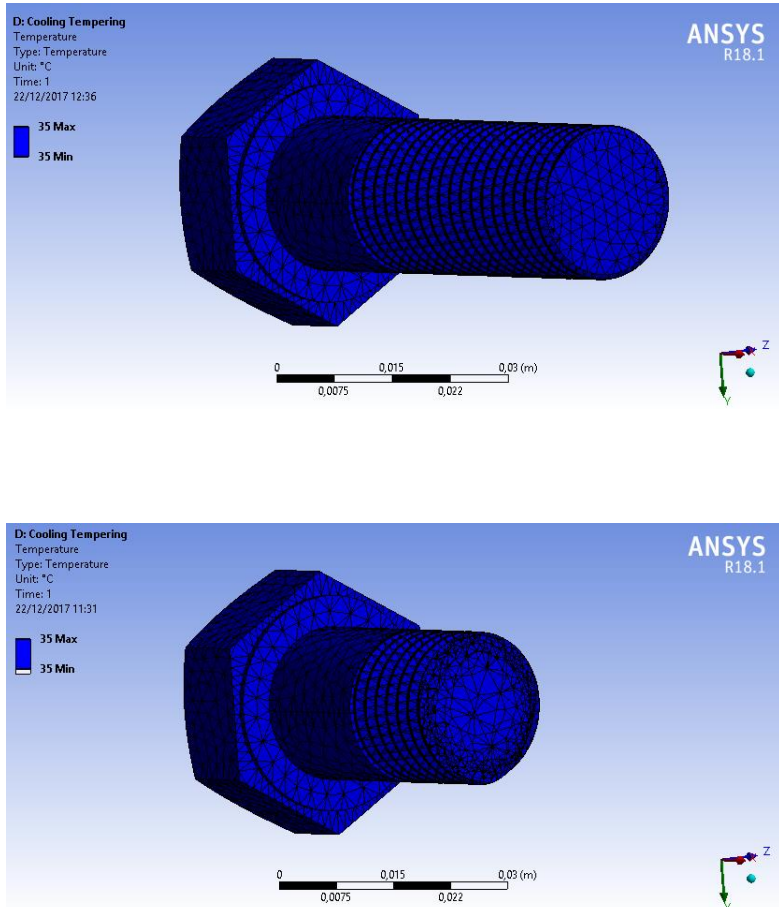
Tabel 4. 3 Distribusi temperatur pada proses heating of tempering.

Waktu (s)	T min ($^{\circ}\text{C}$)	T max ($^{\circ}\text{C}$)
1800	369,66	372,76



D. Hasil Distribusi Temperatur pada Proses *Cooling Tempering*

a. Gambar Distribusi Temperatur



Gambar 4. 13 Distribusi temperatur proses cooling of tempering.



b. Tabel Distribusi Temperatur

Tabel 4. 4 Distribusi temperatur pada proses cooling of tempering.

Waktu (s)	T min (°C)	T max (°C)
<i>Steady State</i>	35	35

IV. 2 Pembahasan1. Proses *Heating*

Pada proses heating, nilai koefisien konveksi dilakukan melalui perhitungan sebagai berikut:

dimana, T_{ambient} adalah $850^{\circ}\text{C} = 1123,15^{\circ}\text{K}$

dan T_{baut} adalah $35^{\circ}\text{C} = 303,15^{\circ}\text{K}$

maka,

temperatur film adalah

$$T_f = \frac{T_a - T_b}{2} = 715,65^{\circ}\text{K}$$

berdasarkan sifat udara pada temperatur $715,65^{\circ}\text{K}$ pada tabel 4.5, maka:

$$B = \frac{1}{T_f} = 0,001397331 \text{ K}$$

Perhitungan grashof number,

$$N_{GR} = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot B \cdot \Delta T}{\mu^2} = 702517,0077$$

Perhitungan grashof number dikalikan dengan Prandtl number,

$$N_{GR} \times N_{PR} = 480521,6333$$

Maka, nilai koefisien konveksi adalah,

$$h = \frac{k}{l} \cdot a (N_{GR} \times N_{PR})^m = 11,24062312 \text{ W/m}^2\text{K}$$

dimana, nilai a dan m berdasarkan pada tabel 4.5.

**Tabel 4. 5** Sifat thermal udara pada berbagai temperatur.

Temperature (K)	Specific Heat		Ratio of Specific Heats - k - (c_p/c_v)	Dynamic Viscosity - μ - (10^{-5} kg/m s)	Thermal Conductivity - k - (10^{-5} kW/m K)	Prandtl Number	Kinematic Viscosity ¹⁾ - ν - (10^{-5} m ² /s)	Density ¹⁾ - ρ - (kg/m ³)	Diffusivity - α - (10^{-6} m ² /s)
	- c_p - (kJ/kgK)	- c_v - (kJ/kgK)							
175	1.0023	0.7152	1.401	1.182	1.593	0.744	0.588	2.017	
200	1.0025	0.7154	1.401	1.329	1.809	0.738	0.753	1.785	10.17
225	1.0027	0.7156	1.401	1.467	2.020	0.728	0.935	1.599	
250	1.0031	0.7160	1.401	1.599	2.227	0.720	1.132	1.412	15.87
275	1.0038	0.7167	1.401	1.725	2.428	0.713	1.343	1.284	
300	1.0049	0.7178	1.400	1.846	2.624	0.707	1.568	1.177	22.07
325	1.0063	0.7192	1.400	1.962	2.816	0.701	1.807	1.086	
350	1.0082	0.7211	1.398	2.075	3.003	0.697	2.066	1.009	29.18
375	1.0106	0.7235	1.397	2.181	3.186	0.692	2.317	0.9413	
400	1.0135	0.7264	1.395	2.286	3.365	0.688	2.591	0.8824	36.94
450	1.0206	0.7335	1.391	2.485	3.710	0.684	3.168	0.7844	
500	1.0295	0.7424	1.387	2.670	4.041	0.680	3.782	0.7060	
550	1.0398	0.7527	1.381	2.849	4.357	0.680	4.439	0.6418	
600	1.0511	0.7640	1.376	3.017	4.661	0.680	5.128	0.5883	
650	1.0629	0.7758	1.370	3.178	4.954	0.682	5.853	0.5430	
700	1.0750	0.7879	1.364	3.332	5.236	0.684	6.607	0.5043	
750	1.0870	0.7999	1.359	3.482	5.509	0.687	7.399	0.4708	
800	1.0987	0.8116	1.354	3.624	5.774	0.690	8.214	0.4412	
850	1.1101	0.8230	1.349	3.763	6.030	0.693	9.061	0.4153	
900	1.1209	0.8338	1.344	3.897	6.278	0.696	9.936	0.3922	
950	1.1313	0.8442	1.340	4.026	6.520	0.699	10.83	0.3716	
1000	1.1411	0.8540	1.336	4.153	6.754	0.702	11.76	0.3530	
1050	1.1502	0.8631	1.333	4.276	6.985	0.704	12.72	0.3362	
1100	1.1589	0.8718	1.329	4.396	7.209	0.707	13.70	0.3209	
1150	1.1670	0.8799	1.326	4.511	7.427	0.709	14.70	0.3069	
1200	1.1746	0.8875	1.323	4.626	7.640	0.711	15.73	0.2941	
1250	1.1817	0.8948	1.321	4.736	7.849	0.713	16.77	0.2824	
1300	1.1884	0.9013	1.319	4.846	8.054	0.715	17.85	0.2715	
1350	1.1946	0.9075	1.316	4.952	8.253	0.717	18.94	0.2615	
1400	1.2005	0.9134	1.314	5.057	8.450	0.719	20.06	0.2521	
1500	1.2112	0.9241	1.311	5.264	8.831	0.722	22.36	0.2363	
1600	1.2207	0.9338	1.308	5.467	9.199	0.724	24.74	0.2208	
1700	1.2293	0.9422	1.305	5.646	9.554	0.726	27.20	0.2076	
1800	1.2370	0.9499	1.302	5.829	9.899	0.728	29.72	0.1961	
1900	1.2440	0.9569	1.300	6.008	10.233	0.730	32.34	0.1858	

at pressure 1 atm



Tabel 4. 6 Konstanta perhitungan untuk konveksi natural dan nilai koefisien konveksi beberapa material.

TABLE 4.7-1. *Constants for Use with Eq. (4.7-4) for Natural Convection*

Physical Geometry	$N_{Gr} N_{Pr}$	a	m	Ref.
Vertical planes and cylinders [vertical height $L < 1$ m (3 ft)]				
	$< 10^4$	1.36	$\frac{1}{3}$	(P3)
	$10^4 - 10^9$	0.59	$\frac{1}{4}$	(M1)
	$> 10^9$	0.13	$\frac{1}{3}$	(M1)
Horizontal cylinders [diameter D used for L and $D < 0.20$ m (0.66 ft)]				
	$< 10^{-5}$	0.49	0	(P3)
	$10^{-5} - 10^{-3}$	0.71	$\frac{1}{25}$	(P3)
	$10^{-3} - 1$	1.09	$\frac{1}{10}$	(P3)
	$1 - 10^4$	1.09	$\frac{1}{3}$	(P3)
	$10^4 - 10^9$	0.53	$\frac{1}{4}$	(M1)
	$> 10^9$	0.13	$\frac{1}{3}$	(P3)
Horizontal plates				
Upper surface of heated plates or lower surface of cooled plates	$10^5 - 2 \times 10^7$	0.54	$\frac{1}{4}$	(M1)
	$2 \times 10^7 - 3 \times 10^{10}$	0.14	$\frac{1}{3}$	(M1)
Lower surface of heated plates or upper surface of cooled plates	$10^5 - 10^{11}$	0.58	$\frac{1}{3}$	(F1)

Typical Convection Coefficients to Estimate Thermal Transfer

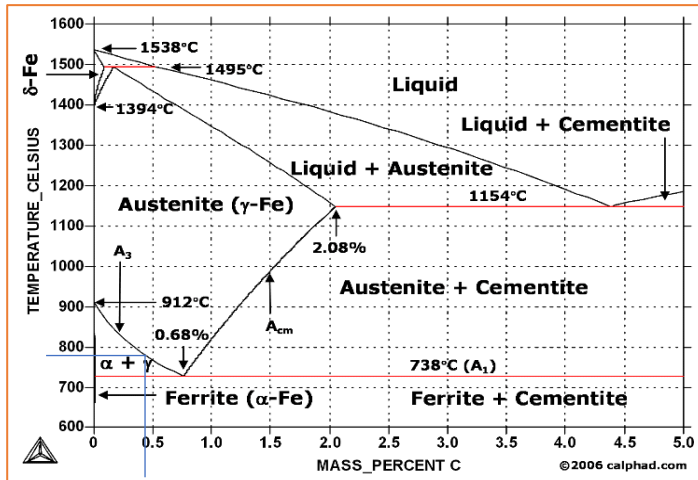
Fluid and Convection Mode	BTU / (hr * sq. ft. * F)	W / (sq. m * K)
Air, Free Convection	0.1 to 0.5	0.5 to 2.5
Water, Free Convection	0.5 to 20	20 to 100
Air, Forced Convection	0.1 to 5	0.5 to 30
Water, Forced Convection	50 to 2,000	300 to 10,000
Oil, Forced convection	10 to 300	50 to 2,000
Boiling Water	500 to 10,000	3,000 to 60,000

Pada proses heating, distribusi temperatur sudah cukup baik. Hal ini ditunjukkan dengan prosedur pemanasan 850 °C yang



diatur melalui pemanas (sebagai ambient temperature) dan ditahan selama 1 jam, dimana material baut memiliki temperatur awal (initial temperature) 35°C menunjukkan distribusi temperatur yang homogen.

Ditunjukkan pada hasil diatas (gambar 4.4), bahwa pada saat $t = 900$ s atau 15 menit proses *heating* berjalan. Temperatur maximum pada baut sudah mencapai $489,06^{\circ}\text{C}$ dan temperatur minimum $473,28^{\circ}\text{C}$. Pada saat $t = 1800$ s atau 30 menit proses *heating* berjalan, temperatur maximum pada baut sudah mencapai $684,91^{\circ}\text{C}$ dan temperatur minimum $677,7^{\circ}\text{C}$. Kemudian, pada saat $t = 3600$ s atau 1 jam proses *heating* berjalan. Temperatur maximum pada baut sudah mencapai $813,6^{\circ}\text{C}$ sementara untuk keadaan minimum pada baut adalah dengan temperatur 812°C . Ketiganya memiliki rentang perbedaan temperatur yang kecil antara temperatur maksimum dan minimum, menandakan bahwa distribusi temperatur merata pada seluruh tubuh baut, begitu pula ditunjukkan dengan analisis melalui potongan melintang pada bagian ulir baut dimana menunjukkan keseragaman temperatur yang baik (gambar 4.1, 4.2 dan 4.3), pada hal temperatur austenisasi dari material baut S45C (AISI 1045) adalah $800^{\circ}\text{C} - 880^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4. 14 Temperature austenisasi untuk material S45C

(Callister. 2009)

2. Proses *Quenching*

Pada proses quenching, nilai koefisien konveksi diambil dari tabel koefisien konveksi untuk oli dengan agitasi (konveksi paksa) dengan nilai $1.250 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pada proses *quenching*, penentuan temperatur awal pada baut (*initial temperature*) berbeda daripada proses sebelumnya, yaitu *heating*, yang memiliki temperature uniform pada initial temperatur sebesar 35°C . Untuk proses *quenching* keadaan untuk initial temperature baut merupakan keadaan akhir dari proses *heating* (austenisasi), yang mana keadaan tersebut bukanlah temperatur yang uniform (*not uniform temperature*) pada sepanjang geometri baut. Untuk itu, digunakan data simulasi untuk keadaan tersebut dari proses *heating* yang nilai temperaturnya berbeda-beda di sepanjang geometri baut.



Pada proses *quenching* menggunakan medium oli yang diagitasi, distribusi temperatur menunjukkan perbedaan temperatur yang tinggi pada tubuh baut dikarenakan pendinginan yang sangat cepat. Hal ini ditunjukkan melalui, rentang perbedaan temperatur yang tinggi pada Gambar (4.5, 4.6, 4.7, 4.8 dan 4.9). Pada saat $t=5s$, nilai temperatur minimum adalah $335,32^{\circ}C$ dan maximum $651,93^{\circ}C$, pada saat $t=10s$, nilai temperatur minimum adalah $205,49^{\circ}C$ dan maksimum adalah $470,94^{\circ}C$, pada saat $t=15s$, nilai temperatur minimum adalah $137,84^{\circ}C$ dan maksimum adalah $341,02^{\circ}C$, pada saat $t=20s$, nilai temperatur minimum adalah $101,41^{\circ}C$ dan maksimum adalah $250,8^{\circ}C$, dan pada saat $t=30s$, nilai temperatur minimum adalah $70,672^{\circ}C$ dan maksimum adalah $147,21^{\circ}C$. Laju pendinginan yang dicapai sudah mencapai nilai diatas batas minimum untuk laju pendinginan kritis pada material AISI 1045. Batas minimum untuk temperatur *martensit start* (M_s) dan *martensit finish* (M_f) didapatkan melalui perhitungan analitik dengan persamaan sebagai berikut:

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo$$

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474(0,48) - 33(0,7) - 17(0,3) - 17(0,03) - 21(0,001) = 304,749$$

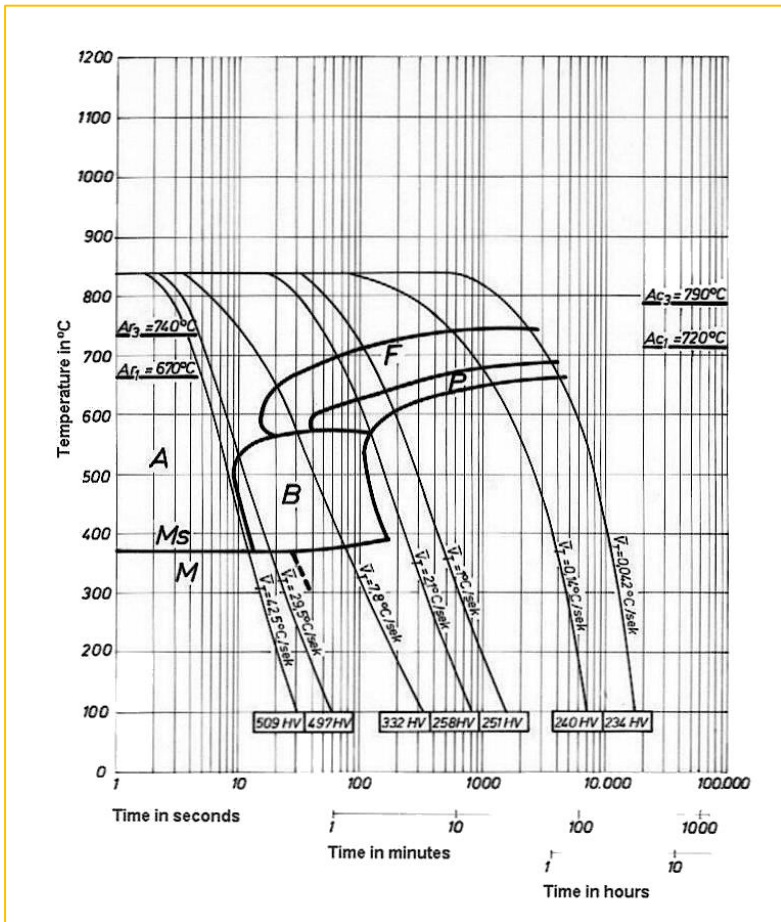
sementara itu, nilai m_f adalah:

$$M_f(^{\circ}C) = M_s - 215^{\circ}C = 89,749^{\circ}C$$

Kemudian seperti yang telah diketahui melalui proses perhitungan secara analitik mengenai temperature dari *martensit start* (M_s) adalah $304,749^{\circ}C$ dan temperature *martensit finish* (M_f) adalah $89,749^{\circ}C$, maka keadaan baut mencapai titik temperatur M_s adalah saat proses *quenching* sudah berjalan selama kurang lebih 6 s, dimana ditunjukkan bahwa keadaan temperature minimum pada baut tersebut sudah mencapai $300^{\circ}C$. Pada proses *quenching* ini laju pendinginan didapatkan sebesar $85^{\circ}C/s$. Hal ini menghasilkan



laju pendinginan untuk pembentukan martensit telah tercapai, dimana untuk material baut berupa AISI 1045 memerlukan laju pendinginan minimum sebesar $42,5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ seperti pada data *Cooling Curve Transformation* (CCT) diagram untuk material tersebut. Kemudian untuk seluruh geometri baut telah mencapai M_f adalah pada saat proses quenching sudah berjalan selama 53,8 s, dimana ditunjukkan keadaan temperatur maximum pada baut tersebut sudah mencapai $78,205\text{ }^{\circ}\text{C}$, dimana berdasarkan perhitungan nilai M_f adalah $89,749\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga pada waktu tersebut M_f untuk 100% struktur mikro martensit telah tercapai. Dapat disimpulkan bahwa dengan prosedur pendinginan cepat yang demikian dapat dicapai kadar struktur mikro martensit yang optimal yaitu 100%.



Gambar 4. 15 Batas cooling rate minimum material AISI 1045

(Callister. 2009)

3. Proses *Heating of Tempering*

Pada proses heating of tempering, nilai koefisien konveksi dilakukan melalui perhitungan sebagai berikut:



dimana, $T_{\text{ambient}} \text{ adalah } 450^{\circ}\text{C} = 723,15^{\circ}\text{K}$
 dan $T_{\text{baut}} \text{ adalah } 55^{\circ}\text{C} = 328,15^{\circ}\text{K}$

maka,
 temperatur film adalah

$$T_f = \frac{T_a - T_b}{2} = 525,65^{\circ}\text{K}$$

berdasarkan sifat udara pada temperatur $525,65^{\circ}\text{K}$ pada tabel 4.5,
 maka:

$$B = \frac{1}{T_f} = 0,001902407 \text{ K}$$

Perhitungan grashof number,

$$N_{GR} = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot B \cdot \Delta T}{\mu^2} = 1414878,884$$

Perhitungan grashof number dikalikan dengan Prandtl number,

$$N_{GR} \times N_{PR} = 962117,6411$$

Maka, nilai koefisien konveksi adalah,

$$h = \frac{k}{l} \cdot a (N_{GR} \times N_{PR})^m = 10,31949412 \text{ W/m}^2\text{K}$$

dimana, nilai a dan m berdasarkan pada tabel 4.5.

Pada proses tempering (gambar 4.11) dengan perlakuan tempering selama 30 menit pada temperatur 450°C , menyebabkan temperatur naik hingga $372,76^{\circ}\text{C}$. Temperatur tersebut telah melalui temperatur martensit start, yang artinya dengan kondisi demikian akan dapat merubah kadar strukturmikro martensit yang sudah tercapai sebelumnya.

Proses tempering biasa diterapkan terhadap logam baja yang telah mengalami proses perlakuan panas *quenching*. Karakteristik produk hasil proses *quenching* adalah rapuh dan



mengandung sejumlah tegangan sisa. Logam baja ini tidak memiliki keuletan yang cukup untuk sejumlah aplikasi. Maka, untuk menghasilkan suatu produk yang menuntut keuletan dan tahan terhadap gesekan perlu dilakukan proses pemanasan ulang atau temper. Tujuan dari penemperan adalah untuk mengurangi tegangan sisa, meningkatkan ketangguhan dan keuletan yang telah hilang atau berkurang selama mengalami pengerasan martensit. Selama proses tempering berlangsung akan terjadi perubahan fasa sesuai dengan temperatur proses laku panasnya. Struktur yang terbentuk sangat tergantung pada temperatur dan waktu temper yang diterapkan. Adapun dekomposisi fasa selama proses tempering mengikuti fenomena berikut:

Martensit (M) \longrightarrow Martensit temper (Ferrit + Karbida)

Setelah melalui proses tempering, logam baja memiliki struktur ferit dengan partikel-partikel sementit yang terdistribusi pada matriksnya. Matriks yang ulet dengan sebaran partikel yang keras akan menghasilkan suatu logam yang tangguh. Fasa ferit merupakan fasa matriks dengan sifat lunak dan ulet. Sedangkan fasa sementit atau karbida yang terbentuk memiliki sifat yang keras.

Pada temperatur tempering yang lebih tinggi, martensit akan tereliminasi kemudian membentuk martensit temper atau martensit yang mengandung karbon rendah dengan partikel-partikel karbida halus membentuk spheroid (karbida spheroid). Karbida spheroid halus ini akan tumbuh membentuk karbida spheroid yang lebih besar pada temperatur yang lebih tinggi.

Pada temperatur temper yang lebih tinggi, jumlah fraksi fasa lunak dan ulet akan bertambah, yang diikuti dengan membesarnya ukuran partikel karbida. Konsekuensi langsung penambahan fasa lunak dan ulet adalah kemampuan regangan menjadi lebih besar. Namun karena adanya sebaran partikel



karbida yang dapat menahan deformasi plastis, maka logam akan tetap memiliki kekuatan yang cukup tinggi. Dengan demikian secara keseluruhan logam menjadi kuat, ulet dan tangguh (Thelning, 1984)

4. Proses Cooling of Tempering

Pada proses cooling of tempering simulasi temperatur dilakukan secara *setady-state* atau tidak bergantung pada perubahan waktu, dimana tidak seperti pada ketiga simulasi sebelumnya yang menggunakan *transient thermal* (bergantung pada perubahan waktu), nilai koefisien konveksi dilakukan melalui perhitungan sebagai berikut:

dimana, T_{ambient} adalah $35^{\circ}\text{C} = 308,15^{\circ}\text{K}$

dan T_{baut} adalah $450^{\circ}\text{C} = 723,15^{\circ}\text{K}$

maka,
temperatur film adalah

$$T_f = \frac{T_a - T_b}{2} = 515,65^{\circ}\text{K}$$

berdasarkan sifat udara pada temperatur $515,65^{\circ}\text{K}$ pada tabel 4.5, maka:

$$B = \frac{1}{T_f} = 0,0019393\text{K}$$

Perhitungan grashof number,

$$N_{GR} = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot B \cdot \Delta T}{\mu^2} = 1515346,37$$

Perhitungan grashof number dikalikan dengan Prandtl number,

$$N_{GR} \times N_{PR} = 1030435,531$$

Maka, nilai koefisien konveksi adalah,

$$h = \frac{k}{l} \cdot a (N_{GR} \times N_{PR})^m = 10,49800003 \text{ W/m}^2\text{K}$$



dimana, nilai a dan m berdasarkan pada tabel 4.5.

Validasi dilakukan untuk nilai kadar struktur mikro martensit 90-100% dapat diambil korelasi dengan nilai kekerasan yang didapatkan setelah proses *quenching* dilakukan.

Tabel 4. 7 Nilai kekerasan dari berbagai mikro struktur

Steel Microstructure	Maximum HRC values
Ferrite	10-15
Austenite	10-15
Pearlite	40-43
Upper Bainite	40-45
Lower Bainite	58-60
Martensite	65-66

(Sumber: <https://www.asminternational.org/>)

Seperti pada tabel 4.7 diatas, bahwa nilai kekerasan HRC seharusnya untuk struktur mikro martensit ini adalah berkisar pada range 65-66 HRC. Tetapi secara khusus lagi mengingat bahwa terdapat pengaruh kadar karbon maka, nilai kekerasan martensit dengan kandungan diatas 90% martensit untuk material AISI 1045 adalah berkisar antara 55 – 60 HRC (Gambar 4.17).

Namun, berdasarkan data lapangan (Gambar 4.18) untuk kekerasan material setelah proses quench yang terjadi adalah sebesar 30,5 HRC atau setara dengan dibawah 50% martensit. Nilai tersebut masih sangat jauh untuk kadar 90% martensit.

Kekerasan sesudah penemperan tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur, tetapi juga waktu penemperan (mengingat bahwa perubahan fase yang terjadi pada penemperan adalah proses yang



dikendalikan oleh difusi, *temperature activated*, dan *time dependent*).

Holomon dan Jaffe menyatakan hubungan ini dengan suatu parameter temper (tempering parameter). Kekerasan yang sama akan diperoleh bila penemperan dilakukan dengan parameter temper yang sama. Parameter temper dinyatakan sebagai:

$$P = T (k + \log t)$$

Dimana,

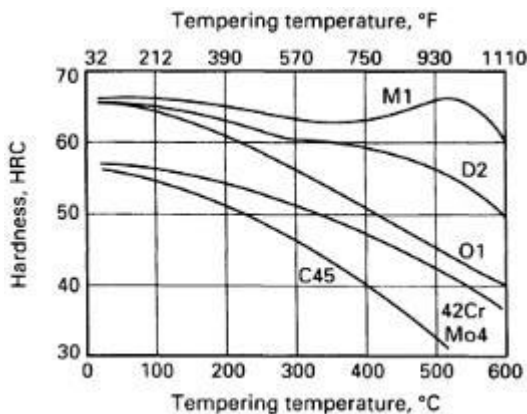
P adalah parameter temper

T adalah temperatur temper (absolut, °K atau °R)

k adalah konstanta (20, dalam °K dan 18 dalam °R)

t adalah waktu temper (jam)

Selanjutnya dapat dihitung estimasi kekerasan yang terjadi berdasarkan proses tempering sesuai dengan prosedur (temperatur dan waktu) yang ada menggunakan korelasi kurva tempering untuk kekerasan, waktu dan temperatur seperti pada gambar 4.16 berikut.

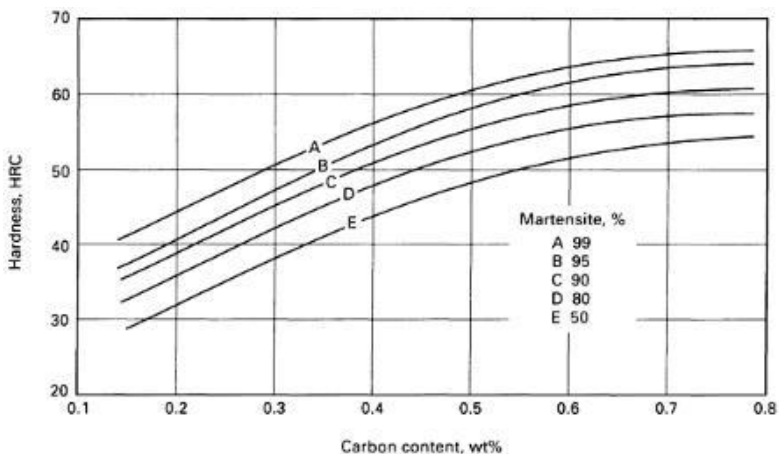


Gambar 4. 16 Kurva tempering S45C

(Callister. 2009)



Ketangguhan baja meningkat dengan menurunnya kekerasan. Namun, bila beberapa unsur pengotor seperti arsen, fosfor, antimon, dan timah ada, ketangguhan minimum yang disebut "embrittlement temper" dapat terjadi pada kisaran temperatur 350 sampai 600°C (660 sampai 10°F) karena terjadi pemisahan oleh pengotor ke batas butir. Temperatur embrittlement merupakan masalah pada bagian-bagian yang terkena temperatur di kisaran kritis untuk waktu yang agak lama dan dalam bagian yang berukuran cukup besar yang membutuhkan waktu lama untuk memanaskan dan mendinginkan. Tetapi hal ini tidak menimbulkan masalah untuk bagian yang sedikit terpapar temperatur kritis dan berukuran kecil. Baut, misalnya, terbuat dari berbagai jenis baja, dilunakkan pada rentang temperatur ini tanpa masalah asalkan digunakan pada temperaaur yang lebih rendah. (Thelning. 1984).



Gambar 4. 17 Nilai kekerasan martensit berdasarkan kadar karbon.

(Callister. 2009)



LAPORAN HASIL TES LABORAT

IMUR MEGAH STEEL

Tanggal: 21-11-2017 No. Urut Laborat: 61 ¹⁰⁴⁵ ^{11¹⁵} Pengirim: R. L. H. A

No. Urut	Tgl. Terima	Dia.	Jenis	No. Heat	Tes Quenching	Hasil Tes	Temp.	Ket.
No.	Potong	Wire Rod	(mm)	Bahan	(Martensite)	HRC		
1	170	20x	4140		553/559/556/560	34.5/35.0	600	
2	171	20x	4140		444/556/482/552	34.9/35.0	600	
3	172	18	60B34A		517/508/505/524	34.7/34.9	450	
4	173	21x	4140		551/565/561/543	34.1/33.9	600	
5	174	20x	4140		537/545/535/542	33.2/32.8	600	
6	175	20x	4140	3032/14	546/550/549/545	34.1/33.4	600	
7	176	16	6023 cen	201305-3	411/307/349/308	28.5/30.5	450	
8	177	13	60B34A71	101226-3	494/501/512/503	35.3/36.5	450	
9	178	12	6023 cen	301372-3	414/420/408/427	31.2/32.0	450	
10	179	16x	80M440	1007474	487/535/534/556	32.8/32.6/33.1	600	
11	180	20	6045 Ti	110231-1	285/274/305/290	28.2/27.6	450	
12	181	21	74B21A	2911	220/259/277	27.0/28.1	450	
						26.6		

Gambar 4. 18 Nilai kekerasan material 1045 (No. urut 11) berdasarkan data lapangan

(Sumber: Dokumen PT. Timur Megah Steel)



Analisa kegagalan pada kasus ini, ditemukan proses yang membuat produk berada dibawah standar produksi.

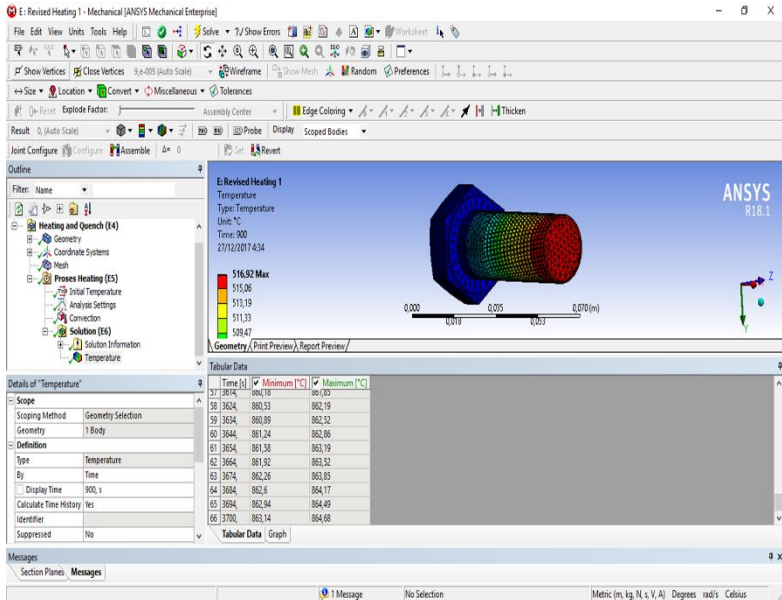
- Data setting mesin pada proses: Hardening 850°C selama 1 jam dan Tempering 450°C selama 30 menit. Perlu diingat bahwa setting temperatur nilainya tidak sama dengan pada tubuh baut (yaitu temperature pada baut nilainya lebih rendah dari setting temperature pada mesin).
- Di PT. Timur Megah Steel, terdapat pedoman proses produksi untuk menghasilkan nilai kekerasan setelah proses quenching yang diharuskan (berdasarkan pada data pengalaman yang *saklek*) supaya tidak mengganggu spesifikasi produk di akhir proses atau kekerasan setelah tempering (karena sudah dianggap memenuhi standar).
- Padahal hal diatas menyebabkan, standar produk akhir memenuhi, tetapi ada satu standar yang diabaikan (dikorbankan), yaitu pemenuhan nilai martensit 90% setelah quench.
- Hal ini menyebabkan kualitas produk menurun dan ditolak dari pasar Eropa.
- Berdasarkan simulasi, temperature tempering yang dicapai masih belum bisa untuk dikatakan aman (sesuai pada standar manual material). Hal ini dilihat dari distribusi temperature pada proses tempering selama 30 menit, dimana dihasilkan temperature maximum pada baut adalah masih 372,76 °C dan minimum adalah 369,66. Berdasarkan manual temperature tempering yang harus dicapai adalah 425°C.
- Sama halnya pada proses Hardening. Dimana berdasarkan distribusi temperature untuk tahap pemanasan selama 1 jam diperoleh temperature maximum pada baut masih sebesar 813,6 °C dan minimumnya adalah 812 °C. Hal ini masih belum mencapai target dimana sebesar 850 °C.



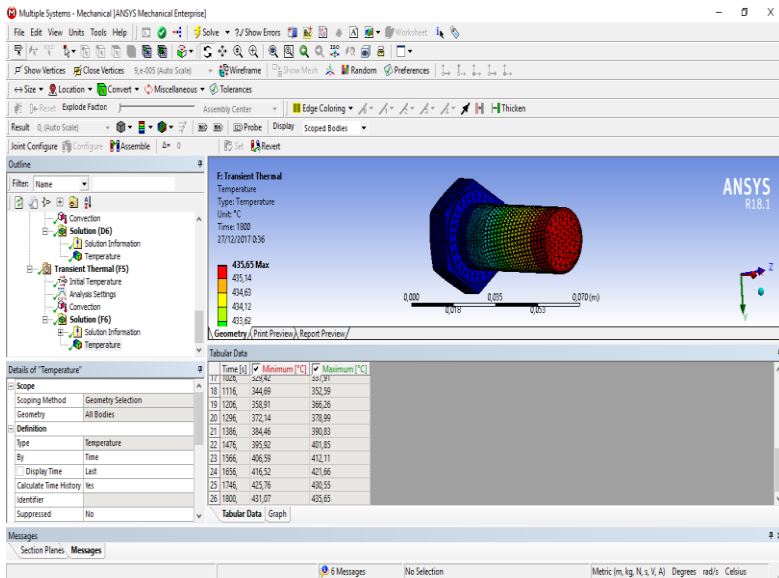
- Proses quench pada tahap hardening tidak bermasalah, hal ini dikarenakan laju pendinginannya berdasarkan simulasi yang dilakukan, sudah mencapai diatas $42,5^{\circ}\text{C/s}$, yaitu 85°C/s .
- Kesalahan fatal kenapa tidak dapat memenuhi (martensit 90%) adalah karena temperatur austenisasi tidak tercapai. Dan takut nilai kekerasan setelah quench melebihi dari data pengalaman yang ada. Padahal nilai itu belum maksimal dan jauh dari standar.
- Kekhawatiran terhadap tidak dapat menurunkan kekerasan after tempering setelah proses quench agar sesuai dengan standar kekerasan yang ada disebabkan masih belum optimumnya temperature tempering.
- Jadi disana terdapat data *after quench hardness* dan *hardness after tempering* berdasarkan pengalaman perusahaan yang saklek yang menitikberatkan pada kekerasan hasil akhir saja (*hardness after tempering*).
- Sehingga apabila merubah kekerasan setelah *quench* yang terlalu tinggi (supaya mendapat martensit diatas 90%), perusahaan sulit memperkirakan bagaimana proses tempering yang sesuai untuk memenuhi standar baut.
- Sehingga perlunya simulasi terhadap distribusi temperatur pada baut untuk menjadi solusi dari permasalahan tersebut.
- Pada bagian analisis kegagalan ini, peneliti meninjau ulang proses distribusi temperatur dengan merubah variable temperatur pada masing-masing proses.
- Yaitu menaikkan menjadi 900°C untuk proses hardening dan 550°C untuk proses tempering. Keduanya dengan durasi (waktu tahan) yang sama dengan proses yang sebelumnya dilakukan.



Peninjauan ulang terhadap proses yang dilakukan, dengan merubah temperatur pemanasan menjadi 900°C dan temperatur tempering menjadi 550°C , didapatkan hasil seperti pada gambar 4.19 (untuk pemanasan) dan gambar 4.20 (untuk tempering).



Gambar 4. 19 Peninjauan ulang terhadap temperatur pemanasan



Gambar 4. 20 Peninjauan ulang terhadap temperatur tempering.

Dari peninjauan ulang tersebut didapatkan hasil bahwa pada kondisi menaikkan proses hardening hingga temperature 900°C, akan diperoleh temperature pada baut sebesar 864,68°C untuk maximum dan 863,14 °C untuk minimum. Hal ini menghasilkan produk *after quench* yang lebih memenuhi standar martensit 90% dikarenakan temperature austenisasi pada baut tercapai sesuai dengan manual yaitu 850 °C.

Pada kondisi menaikkan temperature tempering hingga 550 °C, akan diperoleh temperature pada baut sebesar 435,65 °C untuk maximum dan 431,07 untuk minimum. Hal ini menghasilkan produk *after tempering* yang memenuhi standar dikarenakan temperature tempering pada baut tercapai sesuai dengan manual yaitu 425 °C.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil dan analisa data yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Prosedur untuk simulasi distribusi temperatur akibat proses pengerasan (*hardening process*) dalam objek berbentuk baut ditinjau berdasarkan perpindahan panas konveksi untuk masing-masing proses, yaitu:
 - a. Proses *heating*, dengan nilai koefisien konveksi sebesar $11,24062312 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - b. Proses *quenching*, dengan nilai koefisien konveksi sebesar $1.250 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - c. Proses *heating of tempering*, dengan nilai koefisien konveksi sebesar $10,31949412 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - d. Proses *cooling of tempering*, dengan nilai koefisien konveksi sebesar $10,49800003 \text{ W/m}^2\text{K}$
2. Pada analisis distribusi temperatur terhadap struktur mikro martensit yang dihasilkan untuk material baut akibat proses pengerasan (*hardening process*) didapatkan distribusi temperatur yang merata (ditunjukkan dengan perbedaan temperatur yang tidak terlampaui tinggi).
 - a. Dimana pada proses *heating* dengan $t=15$ menit dicapai nilai temperatur maximum pada baut sudah mencapai $489,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur minimum pada baut adalah $473,28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pada $t=30$ menit dicapai nilai temperatur maximum pada baut sudah mencapai $684,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur minimum pada baut adalah $677,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan pada $t = 60$ menit (waktu akhir proses *heating*) dicapai nilai temperatur maximum pada baut sudah mencapai



813,6 °C dan temperatur minimum pada baut adalah 812 °C.

- b. Kemudian pada proses *quenching* didapatkan laju pendinginan sebesar 85 °C/s. Hal ini menghasilkan laju pendinginan untuk pembentukan martensit telah tercapai, dimana untuk material baut berupa AISI 1045 memerlukan laju pendinginan minimum sebesar 42,5 °C/s. Sehingga dengan proses *quenching* yang telah dilakukan didapatkan kadar struktur mikro martensit optimal yaitu 100%.
3. Analisis distribusi temperatur terhadap nilai kekerasan yang didapatkan untuk material baut akibat proses pengerasan berdasarkan simulasi adalah 55-60 HRC setelah proses *quenching*. Namun berdasarkan data pengujian lapangan hasilnya adalah 30,5 HRC atau setara dengan kadar dibawah 50% martensit.

V.1 Saran

1. Berdasarkan hasil simulasi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut antara korelasi proses pengerasan simulasi terhadap nilai kekerasan lapangan agar dapat digunakan sebagai rekomendasi untuk efektivitas proses pengerasan yang dilakukan dengan cara meminimalkan lama waktu pengerasan pada furnace untuk masing-masing target kekerasan baut yang ingin dicapai sehingga meminimalkan biaya produksi.
2. Perlu dilakukan uji kekerasan terhadap baut sebelum memasuki proses pengerasan (dengan cara di perlakuan *normalizing*), untuk mengetahui nilai kekerasan baut awal sebelum mengalami pengerasan sehingga mengetahui kenaikan kekerasan lebih baik



- lagi dan mengetahui kesesuaian standar material yang dipakai terhadap kekerasan yang akan dicapai.
3. Perlu dilakukan uji kekerasan terhadap baut sebelum memasuki proses pengerasan, untuk mengetahui nilai kekerasan baut awal sebelum mengalami pengerasan sehingga mengetahui kenaikan kekerasan lebih baik lagi.
 4. Kekerasan dari data lapangan yang didapat setelah proses *quench* sangat rendah dari seharusnya. Meskipun dari hasil simulasi untuk proses *heating* menunjukkan bahwa austenisasi telah tercapai pada $t = 60$ menit dan dengan asumsi temperatur austenisasi adalah 800°C (dari kisaran $800\text{--}880^{\circ}\text{C}$ untuk material S45C). Hal itu berarti bahwa austenisasi pada material baut ini lebih tinggi dari 800°C , sehingga harus dinaikkan pengaturan temperatur proses pemanasan yang semula adalah 850°C selama 1 jam, dimana hasilnya adalah masih 813°C menjadi 900°C selama 1 jam dimana akan menghasilkan $863,14^{\circ}\text{C}$ (sesuai manual material yaitu 850°C).
 5. Pada proses *tempering*, temperatur *tempering* perlu dinaikkan menjadi 550°C untuk waktu tahan selama 30 menit, hal ini untuk memenuhi prosedur temperatur *tempering* yang sesuai yaitu 425°C .
 6. Dari simulasi ini, dapat digunakan rekomendasi untuk peningkatan temperatur *heating* dan *tempering* pada proses pengerasan untuk baut material S45C di **PT. Timur Megah Steel** - Gresik.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Acevedo, Luis, Uson, S., Uche, J. 2015. “Numerical Study of Cullet Glass Subjected to Microwave Heating and SiC Susceptor Effects. Part I: Combined Electric and Thermal Model”. *Energy Conversion and Management* 97: 439 – 457.
- Abrianto. 2008. “Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik Hasil Proses Perlakuan Panas” *Jurnal Teknik Universitas Jendral Achmad Yani* 8 (11): 90-99.
- Agus Pramono. 2011. Karakteristik Mekanik Proses Hardening Baja Aisi 1045 Media Quenching untuk Aplikasi Sprocket Rantai. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. Banten
- Ahmad Multazam. 2017. *Hardenes Procces Control* Baja Tambang Dengan *Quenching Method*. Fakultas Teknik UNTB. Mataram
- Akinobu Shibata, Shohei Daido, Daisuke Terada dan Nobuhiro Tsuji. 2013. Microstructures of Pearlite and Martensite Transformed from Ultrafine Grained Austenite Fabricated through Cyclic Heat Treatment in Medium Carbon Steels. The Japan Institute of Metals and Materials. Japan
- Amit Kohli. 2014. FEA Simulation *Thermal* Analysis of Induction Hardening Process in Case of AISI 1040 Steel. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* (IJEIT). India
- Amrih Prayoga, dkk. 2017. *Pengerasan Permukaan Induksi*. Universitas Diponegoro: Semarang

- Andrianto, Arif. 2011. Pengaruh Quenching-Tempering Terhadap Kekuatan Impak Baja Karbon Aisi 1045. Universitas Lampung
- Arif Hamdam. 2015. Effect of Austenitization Temperatur and Holding Time on Transformation Plasticity in a Three-Point Bending System. Journal of the Society of Materials Science. Japan
- Avner, Sidney H., 1987. Introduction to physical metallurgy, second edition, McGraw Hill International Book Company, Tokyo
- Bayu Wijaya Permana Putra. 2012. Perpindahan Energi Panas
- Bhaskar Chandra Kandpal. 2011. A Review on Jominy Test and Determination of Effect of Alloying Elements on Hardenability of Steel Using Jominy End Quench Test. International Journal of Advances in Engineering & Technology. India
- Bejan, Adrian and Kraus, Alan D. 1948. Heat Transfer Hadbook. John Wiley & sons. Newyork.
- Bondan T. Sofyan. 2011. Pengantar Material Teknik. Salemba Teknika, Jakarta
- Callister, W. (2009). Materials Science and Engineering an Introduction Eight Edition. US: John Wiley & Sons, Inc.
- C. H Young, dkk. 1995. Computer Modelling for Yield Strength of The Mixed Microstructures of Bainite and Martensite. Journal de physique IV
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T. 2011. “Microwave Material Processing—A Review”. AICHe Journal 58, 2: 330-363.

- C. LI, J. L. WANG. 1993. Effect of Pre-Quenching on Martensite-Bainitic Microstructure and Mechanical Properties of GCr15 Bearing Steel. Journal of Materials Science. China
- Christie J Geankoplis. 1993. Transport Processes and Unit Operations Third Edition. University of Minnesota. Prentice-Hall. USA
- D. Scott MacKenzie. 2016. Care and Maintenance of Quench Oils. Houghton International, Inc., Valley
- Defri Irawan, Budi Kristiawan, dan Eko Prasetyo Budiana. 2013 Studi Eksperimental Perpindahan Kalor Konveksi Fluida Nano Al_2O_3 / Ethylene Glycol pada Circular Tube di Bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. Universitas Sebelas Maret. Surakarta
- E.C Bain. 1961. Alloying Element in Steels.
- Elvis A. Sumaraw. 2010. Pengaruh Heat Treatment Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja CrMoV Dengan Media Quench Yang Berbeda. LAPAN
- Era Satyarini. 2013. Optimalisasi Sifat-Sifat Mekanik Material S45C. Universitas Atma Jaya. Yogyakarta
- Ferdiansyah Iqbal Rafandi. 2017. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Objek Berbentuk Silinder Dan Balok Akibat Radiasi Gelombang Mikro Menggunakan Metode Elemen Hingga Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- G.E. Totten dan G.M. Webste. 1996. Effect of Section Size, Quenchant Concentration and Agitation on The Physical Properties of Type i- Polymer Quenched Aluminum Alloys. Union Carbide Corporation Tarrytown. New York

- Hasta, Kuntara ,2005, Pengaruh Perlakuan Panas Tempering Terhadap Kekuatan Tarik dan Ketangguhan Impak Baja X165 CrMoV12 Untuk Cetakan, Proceeding STTNas, Yogyakarta.
- Holman, J.P. 1983. Heat Transfer sixth edition. McGraw Hill. London
- Hollomon, J.H.; Jaffe, L.D. 1945. "Time-temperatures relations in tempering steel". Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. 162: 223–249.
- J. K. Odusote. 2012. *Evaluation of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel Quenched in Water and Oil Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. Nigeria
- Jamiu Kolawole Odusote, dkk. Evaluation of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel Quenched in Water and Oil. Department of Metallurgy and Material Engineering, University of Ilorin, AU
- Jotho. Uji Eksperimental Pengaruh Perubahan Temperatur Lorong Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Pelat Datar. Universitas Pandanaran
- Klaus-Jurgen Bathe. 1996. Finite Element Procedures. New Jersey. USA
- M. Riaz, N. Atiqah. 2014. A Study on The Mechanical Properties of S45C Medium Type Carbon Steel Specimens Under Lathe Machining and Quenching Conditions. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. Malaysia

- Ma'sum, Arsana, Malik, Priyono, dan Altway. 2012: Analisis Perpindahan Panas dengan Konveksi Bebas dan Radiasi pada Penukar Panas Jenis Pipa dan Kawat. Jurnal Teknik Kimia
- Madenci, Erdogan dan Guven, Ibrahim. 2015. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. New York: Springer.
- Muhammad Muqorrobin, Sri Mulyo Bondan Respati, dan Imam Syafaat. Analisis Pengujian Kemampukerasan Baja Tahan Karat 420 Dengan Alat Jominy. Universitas Wahid Hasyim. Semarang
- M. Moallemi, dkk. 2016. Deformation-Induced Martensitic Transformation in a 201 Austenitic steel: The Synergy of Stacking Fault Energy and Chemical Driving Force. Materials Science & Engineering. Iran Widodo Slamet. 2013. Proses manufaktur dan integrasi struktur inasat-1 Lapan.
- Ndaliman. 2006. *An Assessment of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel under Different Quenching Media*. Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology Minna. Nigeria
- Nirajkumar Mehta. 2013. Transient Heat Transfer Analysis of Induction Furnace by Using Finite Element Analysis. Indian Journal of Applied Research. India
- Nurun Nayiroh. 2013. Perlakuan Panas Pada Baja (Sistem Besi-Karbon)
- Reinaldy Nazar. 2016. Karakteristik Perpindahan Panas Konveksi Alamiah Aliran Nanofluida AL_2O_3 Air di Dalam Pipa

Anulus Vertikal. Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan. BATAN

Reynolds, William C dan Perkins, Henry C. 1983. Engineering Thermodynamics. McGraw Hill. New York.

Rio Dery Alem, dkk. 2015. Inverter Frekuensi Tinggi Sebagai Pemanas Piringan Logam Dengan Metode Induksi Pada Aplikasi Pemanas Roti. Universitas Diponegoro. Semarang

Ryan Noviansyah. 2012. Pemanas Induksi (Induction Heating) Kapasitas 200 Watt. Universitas Gunadarma. Depok

Rommel T. 2017 Analisa Dan Simulasi Numerik Proses Sand Casting Dalam Pembuatan House Moving Contact Resistor Berbahan Dasar Aluminium 6061. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

R.R. Blackwood dan W.D. Cheesman. Metal Quenching Medium. 1996. U.S. Patent, 3.220.893

Singhvi, S.S., & Desai, H.B. (1971). An empirical analysis of the quality of corporate financial disclosure. *The Accounting Review*, 46 (1), 129-138.

Saeed Moaveni. 1999. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Minnesota State University, Mankato New Jerse. USA

Sigit Gunawan, 2005, Pengaruh Suhu Temper Terhadap Ketangguhan Impak dan Kekuatan Tarik Baja AISI 420, Proceeding STTNas, Yogyakarta.

Smith and Hashemi. 2006. Foundations of Materials Science and Engineering. The McGraw-Hill Companies, Inc

- Stoecker, Wilbert F dan Jones, Jerold W. 1982. Refrigeration and Air Conditioning. New York.
- Thai Nguyen. 2010. Grinding–Hardening Using Dry Air and Liquid Nitrogen: Prediction and Verification of Temperatur Fields and Hardened Layer Thickness. School of Mechanical and Manufacturing Engineering. The University of New South Wales. Australia
- Thelning, K.E. 1984. Steel and Its Heat Treatment, Second Edition. Butterworth
- Theodore L Bergman, dkk. 2011. Seventh Edition Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. United States of America
- Umrowati, Prof. DR. Basuki Widodo, M.Sc, dan Drs. Kamiran, M.Si. 2011. Analisis Pengaruh Perpindahan Panas terhadap Karakteristik Lapisan Batas pada Pelat Datar. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- V.N.Potluri, 2004, Effect of Heat Treatment On Deformation and Corrosion Behavior of Type 422 Stainless Steel, Thesis of MSc in Mechanical Engineering Graduate College University of Nevada.
- Wahyudi. 2010. Analisa Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Baja Karbon Rendah St 40 Dengan Metode Pack Carburizing. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang
- Wibowo B. T. 2006. Pengaruh Temper dengan Quenching Media Pnedingin Oli Mesran SAE 40 Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis baja ST-60, Laporan Tugas Akhir, Universitas Negeri Semarang.

- Widodo Slamet. 2013. Proses Manufaktur dan Integrasi Struktur Inasat-1 Lapan. Peneliti Pusat Teknologi Satelit Lapan. Jakarta
- Xinyu Mao. 2016. Simulation and Experimental Studies of Induction Heating During the Partial Upset-Extrusion of a Nuclear Main Pipe. SAGE Journal. USA
- Yoga Pratama. 2015. Aplikasi Minyak Kelapa Sawit pada Photovoltaic yang Terintegrasi Pada Dinding Bangunan sebagai Pendingin Pasif untuk Meningkatkan Efisiensi dan Menurunkan Beban Pendingin Ruangan. Universitas Lampung. Lampung

LAMPIRAN-LAMPIRAN

1. Hasil Pengujian Spektrometri pada Baja S45C.

Analysis										
Start	New	Print	Del	Store	Recal	Mode	Load	Change		
Sample: QC-SPT/MX/17/312(Cudang Material)Wire Rod62104520 mm(1)TomyBudamadi										
Element	Burn 1	Burn 2	Burn 3	Burn 4	Burn 5	Burn 6	Burn 7	Burn 8	Burn 9	
Fe %	98.3	98.3	98.3							
C %	0.484	0.480	0.476							
Si %	0.234	0.228	0.226							
Mn %	0.718	0.709	0.708							
P %	0.0215	0.0199	0.0222							
S %	0.0120	0.0125	0.0128							
Cr %	0.0335	0.0340	0.0321							
Mo %	0.0019	0.0016	0.0019							
Ni %	0.0318	0.0105	0.0314							
Al %	0.0135	0.0131	0.0129							
Co %	0.0030	0.0041	0.0101							
Cu %	0.0195	0.0225	0.0205							
W %	0.0069	0.0053	0.0049							
Ti %	0.0869	0.0874	0.0873							
V %	0.0051	0.0048	0.0042							
N %	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100							
Pb %	0.0031	0.0032	0.0034							
B %	0.0034	0.0028	0.0058							
As %	< 0.0004	< 0.0004	< 0.0004							
Ca %	0.0058	0.0055	0.0037							
Se %	0.0043	0.0046	0.0046							
Zn %	0.0010	0.0013	0.0013							
Bi %	0.0054	0.0083	0.0053							
Ag %	0.0070	0.0075	0.0060							
Be %	0.0038	0.0041	0.0044							
Grade										SAE 1045

2. Hasil Simulasi Distribusi Temperatur per Unit Waktu pada Masing-Masing Proses.

- Proses Heating

t (s)	T min (°C)	T max (°C)
0,6	35,054	37,524
1,1673	35,173	38,555
1,7346	35,354	39,348
3,4366	36,156	41,329
8,5424	39,085	46,616
14,542	42,722	52,484
20,542	46,434	58,133
26,542	50,178	63,607
32,542	53,94	68,932
38,542	57,723	74,123
44,542	61,516	79,193
50,542	65,326	84,153
56,542	69,151	89,013
60,	71,358	91,782
68,4	76,736	98,341
76,8	82,124	104,75
102,	98,268	122,9
177,6	145,02	171,4

261,6	194,07	220,17
345,6	239,98	264,94
429,6	282,81	306,31
513,6	322,69	344,66
597,6	359,78	380,26
681,6	394,28	413,34
765,6	426,35	444,09
849,6	456,17	472,66
900,	473,28	489,06
909,	476,32	491,96
918,	479,32	494,85
945,	488,13	503,28
1026,	512,75	526,88
1116,	538,06	551,12
1206,	561,47	573,55
1296,	583,12	594,29
1386,	603,14	613,48
1476,	621,67	631,23
1566,	638,8	647,65
1656,	654,65	662,83
1746,	669,31	676,88

1800,	677,7	684,91
1818,	680,45	687,55
1836,	683,15	690,14
1890,	690,9	697,56
2052,	711,17	716,98
2232,	730,55	735,55
2412,	747,23	751,53
2592,	761,57	765,28
2772,	773,92	777,1
2952,	784,54	787,28
3132,	793,68	796,04
3312,	801,54	803,57
3492,	808,31	810,05
3600,	812,	813,6
3601,	812,04	813,63
3602,	812,07	813,66
3605,	812,18	813,76
3614,	812,48	814,05
3624,	812,81	814,37
3634,	813,15	814,69
3644,	813,48	815,01

3654,	813,8	815,32
3664,	814,13	815,63
3674,	814,45	815,94
3684,	814,76	816,24
3694,	815,08	816,54
3700,	815,27	816,72

- Proses Quenching

(s)	T min (°C)	T max (°C)
5,e-002	734,23	816,54
9,0026e-002	702,13	816,5
0,13005	680,96	816,45
0,25013	645,15	815,7
0,61036	590,04	812,29
1,1104	540,48	802,59
1,6104	501,91	788,29
2,1104	469,27	770,82
2,6104	440,59	751,34
3,1104	414,8	730,83
3,6104	391,32	710,
4,1104	369,78	689,
4,6104	349,9	668,09

5,	335,32	651,93
5,05	333,46	649,86
5,1	331,62	647,79
5,25	326,23	641,61
5,7	311,08	623,4
6,2	295,41	603,62
6,7	280,8	584,36
7,2	267,17	565,62
7,7	254,43	547,44
8,2	242,51	529,81
8,7	231,36	512,77
9,2	220,92	496,28
9,7	211,13	480,32
10,	205,49	470,94
10,05	204,55	469,38
10,1	203,63	467,83
10,25	200,9	463,21
10,7	193,17	449,78
11,2	185,11	435,37
11,7	177,54	421,45
12,2	170,44	408,01

12,7	163,77	395,04
13,2	157,5	382,53
13,7	151,62	370,45
14,2	146,08	358,82
14,7	140,88	347,6
15,	137,87	341,02
15,05	137,37	339,93
15,1	136,88	338,84
15,25	135,42	335,61
15,7	131,29	326,23
16,2	126,96	316,19
16,7	122,9	306,5
17,2	119,07	297,17
17,7	115,47	288,18
18,2	112,08	279,51
18,7	108,89	271,16
19,2	105,88	263,11
19,7	103,05	255,35
20,	101,41	250,8
20,1	100,87	249,3
20,2	100,34	247,8

20,5	98,801	243,42
21,4	94,637	231,12
22,4	90,514	218,42
23,4	86,838	206,62
24,4	83,557	195,66
25,4	80,629	185,48
26,4	78,014	176,03
27,4	75,677	167,26
28,4	73,588	159,11
29,4	71,72	151,55
30,	70,672	147,21
31,7	68,196	136,36
33,4	66,126	126,77
38,5	62,194	106,23
53,8	57,787	78,205
70,8	56,035	64,89
87,8	55,393	59,208
104,8	55,152	56,789
121,8	55,06	55,76
138,8	55,024	55,322
155,8	55,01	55,137

172,8	55,004	55,058
189,8	55,002	55,025
200,	55,001	55,014

- Proses Heating Tempering

t (s)	T min (°C)	T max (°C)
9,	57,016	60,252
18,	59,419	64,154
45,	66,995	74,491
126,	89,754	100,4
216,	114,1	125,68
306,	137,1	148,58
396,	158,66	169,64
486,	178,79	189,13
576,	197,55	207,23
666,	215,03	224,05
756,	231,29	239,7
846,	246,44	254,27
900,	255,14	262,63
909,	256,57	264,02
918,	258,	265,39

945,	262,19	269,42
1026,	273,98	280,75
1116,	286,17	292,47
1206,	297,51	303,38
1296,	308,07	313,53
1386,	317,9	322,98
1476,	327,05	331,78
1566,	335,56	339,97
1656,	343,49	347,59
1746,	350,86	354,68
1800,	355,1	358,75

PROPERTIES OF GRADE 8.8 BOLT & NUT (ISO)

BOLT SIZE	PITCH	STRESS AREA MM2	BOLT/STUD/SCREW ISO 898-1 Gr.8.8					NUT ISO 898-2 Gr.8			
			PROOF STRESS N/MM2	PROOF LOAD KN	TENSILE STRESS N/MM2	TOR- QUE* N-m	HARD- NESS HRC	ELONGA- TION# %	PROOF STRESS N/MM2	PROOF LOAD KN	HARD- NESS HRC
M20	2.5	245.0	600	147.0	830.0	394.7	23-34	12.0	920	225.4	38 Max

3. Sifat Mekanik Baut Grade 8.8

4. Standar Pengujian Kekerasan dan Produk Baut

ISO 898-1:2009(E)

NOTE There may not be a direct relationship between hardness and tensile strength. Maximum hardness values are specified for reasons other than theoretical maximum strength consideration (e.g. to avoid embrittlement).

Hardness may be determined either on a suitable surface or on a transverse section through the threaded portion.

9.9.2 Applicability

This test applies to fasteners having the following specifications:

- all sizes;
- all property classes.

9.9.3 Test methods

Hardness may be determined using the Vickers, Brinell or Rockwell hardness test.

a) Vickers hardness test

The Vickers hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6507-1.

b) Brinell hardness test

The Brinell hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6506-1.

c) Rockwell hardness test

The Rockwell hardness test shall be carried out in accordance with ISO 6508-1.

9.9.4 Test procedure

9.9.4.1 General

Fasteners used for hardness tests shall be as received.

9.9.4.2 Hardness determined on a transverse section through the threaded portion

A transverse section shall be taken $1\ d$ back from the end of the thread, and the surface shall be suitably prepared.

Take hardness readings in the area between the axis and the half-radius position, see Figure 8.



Key

- 1 axis of the fastener
- 2 half-radius area with a radius of $0,25\ d$

Figure 8 — Half-radius area for taking of hardness readings

9.9.4.3 Hardness determined on a surface

The hardness shall be determined on flat surfaces of the head, on the end of the fastener or on the unthreaded shank after removal of any plating or other coating and after suitable preparation of the test specimen.

This method may be used for routine inspection.

9.9.4.4 Test load for hardness determination

Carry out the Vickers hardness test with a minimum load of 98 N.

Carry out the Brinell hardness test with a load equal to $30 D^2$ expressed in newtons.

9.9.5 Requirements

For fasteners which cannot be tensile tested and structural bolts with short thread length which are tensile tested, with free threaded length $l_{th} < 1 d$, the hardness shall be within the hardness range specified in Table 3.

For fasteners which can be tensile tested, with free threaded length $l_{th} \geq 1 d$, and fasteners with waisted shank and machined test pieces, the hardness shall not exceed the values for maximum hardness according to Table 3.

For fasteners of property classes 4.6, 4.8, 5.6 and 5.8, the hardness determined in accordance with 9.9.4.3 at the end of the fastener shall not exceed the values for maximum hardness according to Table 3.

For heat treated fasteners, if any difference in hardness values determined in the half-radius area (see Figure 8) is greater than 30 HV, it shall be verified that the requirements of 90 % content of martensite has been achieved (see Table 2).

For work hardened fasteners of property classes 4.8, 5.8 and 6.8, hardness determined in accordance with 9.9.4.2 shall be within the hardness range specified in Table 3.

In case of dispute, Vickers hardness test according to 9.9.4.2 shall be the referee test method.

5. Panduan Proses Tempering S45C Baut Grade 8.8

Property class	Material and heat treatment	Chemical composition limits (cast analysis, %) ^a					Tempering temperature °C min.
		C min.	C max.	P max.	S max.	B b max.	
8.8 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 ^e	0,40	0,025	0,025		425
	Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025	0,003	
	Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		

- a In case of dispute, the product analysis applies.
- b Boron content can reach 0,005 %, provided that non-effective boron is controlled by addition of titanium and/or aluminium.
- c For cold forged fasteners of property classes 4.6 and 5.6, heat treatment of the wire used for cold forging or of the cold forged fastener itself may be necessary to achieve required ductility.
- d Free cutting steel is allowed for these property classes with the following maximum sulphur, phosphorus and lead contents: sulphur 0,34 %; phosphorus 0,11 %; lead 0,35 %.
- e In case of plain carbon boron steel with a carbon content below 0,25 % (cast analysis), the minimum manganese content shall be 0,6 % for property class 8.8 and 0,7 % for 9.8 and 10.9.
- f For the materials of these property classes, there shall be a sufficient hardenability to ensure a structure consisting of approximately 90 % martensite in the core of the threaded sections for the fasteners in the "as-hardened" condition before tempering.
- g This alloy steel shall contain at least one of the following elements in the minimum quantity given: chromium 0,30 %, nickel 0,30 %, molybdenum 0,20 %, vanadium 0,10 %. Where elements are specified in combinations of two, three or four and have alloy contents less than those given above, the limit value to be applied for steel class determination is 70 % of the sum of the individual limit values shown above for the two, three or four elements concerned.
- h A metallographically detectable white phosphorus enriched layer is not permitted for property class 12.9/12.9. It shall be detected by a suitable test method.
- i Caution is advised when the use of property class 12.9/12.9 is considered. The capability of the fastener manufacturer, the service conditions and the wrenching methods should be considered. Environments may cause stress corrosion cracking of fasteners as processed as well as those coated.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah ﷻ karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Ayah, Ibu, dan kakak dan adik tercinta; Ayah Sukisno, Mamah Sri Suwarni, Mbak Alfian Mey Pramitha Dewi, dan Adik Muhammad Hilal Yahya Hidayat serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, materi, motivasi, dan inspirasi.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D. serta Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu serta saran kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen wali penulis yang selalu membina penulis selama menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI– ITS.
8. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
9. Sahabat penulis dari asal kota yang sama, Salatiga, semasa kuliah di MAMET yang terdiri dari Wafda, Imam dan Sidik yang selalu memberikan semangat dan doa selama penulis menyelesaikan tugas akhir.

10. Sahabat penulis dari asal kota yang sama, Salatiga, semasa kuliah di ITS angkatan 2014 yang terdiri dari Wafda, Imam, Sidik, Adi, Amalia, Dewangga, Dinar, Dipta, Dita, Firdha, Hepta, Kunni, Wisnu, Ayuk, Wildan, dan Yoga yang selalu memberikan semangat dan doa selama penulis menyelesaikan tugas akhir.
11. Teman – teman satu Laboratorium Material Inovasi, Ido, Ayu, Halida, Habiyo, Opiq, Rendi, Yayak, Arifa, mas Adnan dan Mas Mustafid yang membagi semangat dan canda tawa selama di dalam laboratorium.
12. Teman-teman MTC 16/17 yang selalu memberikan cerita dan pengalaman kepada penulis.
13. Teman – teman MT 16 seperjuangan, yang selalu khawatir dan perhatian ketika penulis merasa kesulitan dalam belajar serta menemani perjuangan penulis selama masa perkuliahan.
14. Untuk HWAA tercinta, yang senantiasa rela dan mampu menembus jarak dan waktu menjadi semangat, kekuatan dan memberikan doa kepada penulis.
15. Dan seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Lutfi Yunus Wahab AL-Audhah dilahirkan di Kota Salatiga, Jawa Tengah pada tanggal 29 Desember 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Sultan Fathah Salatiga, SD Negeri 01 Salatiga, SMP Negeri 1 Salatiga dan SMA Negeri 1 Salatiga. Setelah lulus dari pendidikan tingkat SMA tahun 2014 penulis melanjutkan studinya melalui jalur SNMPTN dan menjadi mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya angkatan 2014 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dengan nomor registrasi pokok 0251144000034.

Semasa kuliah, penulis terdaftar sebagai anggota aktif di Departemen Keilmiahan HMMT FTI-ITS pada periode 2015-2016, Kepala Unit Mobil Hidrogen Antasena BSO-HMMT FTI-ITS, Staff di Departemen Kesejahteraan Anggota UKM-ITS Badminton Community dan pernah menjadi Asisten Praktikum Fisika Dasar di Laboratorium Fisika Material dan terakhir mengambil spesialisasi di Laboratorium Pemodelan Material Komputasi.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. FrieslandCampina Kievit Indonesia pada bulan Januari 2017.

Selama menjalani kerja praktek, penulis mendalami topik terkait analisa kegagalan pada penggantian material karbon ke tungsten pada komponen Mechanical Seal. Kemudian di PT. Timur Megah Steel pada bulan Maret dengan topik analisa pembuatan produk baut A325. Dan kemudian di PT. Pupuk Sriwidjada Palembang pada bulan Juli 2017 dengan topik terkait prosedur pengerasan pada material AISI 1035 sebagai material *sprocket gear*.

Selesaiannya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Email : alaudhah.77@gmail.com

No. HP : +62 85799904994